FEBRUAR 2004 · € 6,90 (D/A)

DEUTSCHE AUSGABE DES SCIENTIFIC AMERICAN

Spektrum DER WISSENSCHAFT

> UMWELT: Torfbrände

> MOND: Smart-1 sucht nach Wassereis

> LOGIK: Paradoxa, Zufall und Unvollständigkeit

> GENOM: Schrott in der DNA

www.spektrum.de

ARCHÄOLOGIE

Die versunkenen Indus-Städte

Auf den Spuren einer archaischen Hochkultur

QUANTENPHYSIK

Welle – Teilchen und zurück

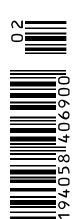
ENERGIE

Erdöl unter dem Meer

HIRNFORSCHUNG

Wie Babys lernen, die Welt zu begreifen

D6179E
13,50 sFr / Luxemburg 8,– €





Reinhard Breuer
Chefredakteur

Fahrstuhl in die Bronzezeit

Neulich berichtete ich über die Rangliste Ihrer Lieblingsthemen: Die Mathematik liegt zum Leidwesen etlicher Leser abgeschlagen auf Platz zehn, die Archäologie jedoch hält sich – gleich nach Astronomie/Kosmologie und Physik – konstant auf Platz drei. Die Erforschung unserer Vergangenheit und der Blick auf unser Kulturerbe fesseln Sie also ganz besonders. Eigentlich überrascht diese Rangfolge nicht, denn Ihre Lieblingsgebiete fügen sich zueinander wie drei Dimensionen eines Faszinationsraumes: als der Blick in kosmische Fernen, in mikroskopische Tiefen sowie in die irdische Vergangenheit.

Den Blick zurück kann uns die Archäologie erschließen – mit allen Schwierigkeiten, das Gewesene zu rekonstruieren. Seit gut 150 Jahren wird beispielsweise im Ruinenfeld von Harappa gegraben und nach den Relikten einer der ältesten Hochkulturen der Menschheit geforscht. Gelegen im Tal des Indus, zwischen dem heutigen Pakistan und Indien, entstand dort vor 4500 Jahren eine Zivilisation, deren technische und kulturelle Errungenschaften erst Jahrhunderte später von anderen antiken Gesellschaften erreicht wurde.

Doch trotz zahlloser überlieferter Artefakte bleiben uns wesentliche Züge der Induskultur bis heute verborgen: So widersetzt sich, allen Versuchen der Linguisten zum Trotz, ihre Schrift der Entzifferung. Auch bleibt rätselhaft, warum ein so stolzes und mächtiges Gemeinwesen offenbar keine Armee zu ihrem Schutz oder zur Eroberung neuer Gebiete unterhielt. Alle Funde belegen, dass allein Handel und Wandel das Volk von Harappa beflügelten. War Nordindien in der Bronzezeit ein ganzes Jahrtausend lang einfach friedlich? (Seite 42)



Das neue Magazin von Spektrum – ab dem 6. Februar im Handel

Archäologie umfasst aber nicht nur das Aufspüren versunkener Kulturen. Politische Ereignisse wie der Krieg im Irak und dessen Folgen machen uns plötzlich bewusst, welche Bedeutung auch die archivierte Geschichte für uns hat. Wir wollen Ihnen nun in einem eigenen Magazin eine breite Vielfalt an Themen präsentieren, die wir in der Archäologie spannend und berichtenswert finden: Unser neues Magazin »Abenteuer Archäologie«, das am 6. Februar in den Handel kommt und vierteljährlich erscheint, berichtet etwa über die unbekannten Pyramiden der Nubier, das Orakel von Delphi oder die Menschenopfer der Azteken.

Als wir das Konzept von »Abenteuer Archäologie« entwickelten, wurde uns noch deutlicher, warum Sie Ihren Interessenschwerpunkt hier setzen: Zu verstehen, woher wir kommen, ist die beste Hilfe dafür herauszufinden, wohin wir wollen.

INHALT

SPEKTROGRAMM

FORSCHUNG AKTUELL

THEMEN

Titelbild: Kunstvoll gefertigter Schmuck demonstrierte Macht und Einfluss der Eliten in Harappa, einer Metropole der frühen Hochkultur im Industal.
Bild: Randy Olson (Aurora Photos)/Ministerium für Archäologie und Museen, Pakistan



SEITE 24

KLIMA

Brennende Regenwälder

Torfwaldbrände in Indonesien setzen ungeheure Mengen des Treibhausgases Kohlendioxid frei. Eingriffe des Menschen sind schuld, dass diese Wälder neuerdings brennen.

SEITE 32

MIKROPHYSIK

Quantenradierer

In der Mikrowelt hat jeder Vorgang je nach Versuchsaufbau Wellen- oder Teilchencharakter. Experimente mit Quantenradierern zeigen, wie durch Löschen des einen Aspekts der andere erscheinen kann.

SEITE 52

SINNE

Wie wir lernen, die Welt zu begreifen

Durch Vergleichen von Eindrücken auf die verschiedenen Sinnesorgane lernen schon Neugeborene die Dinge um sich her kennen – und sich selbst.

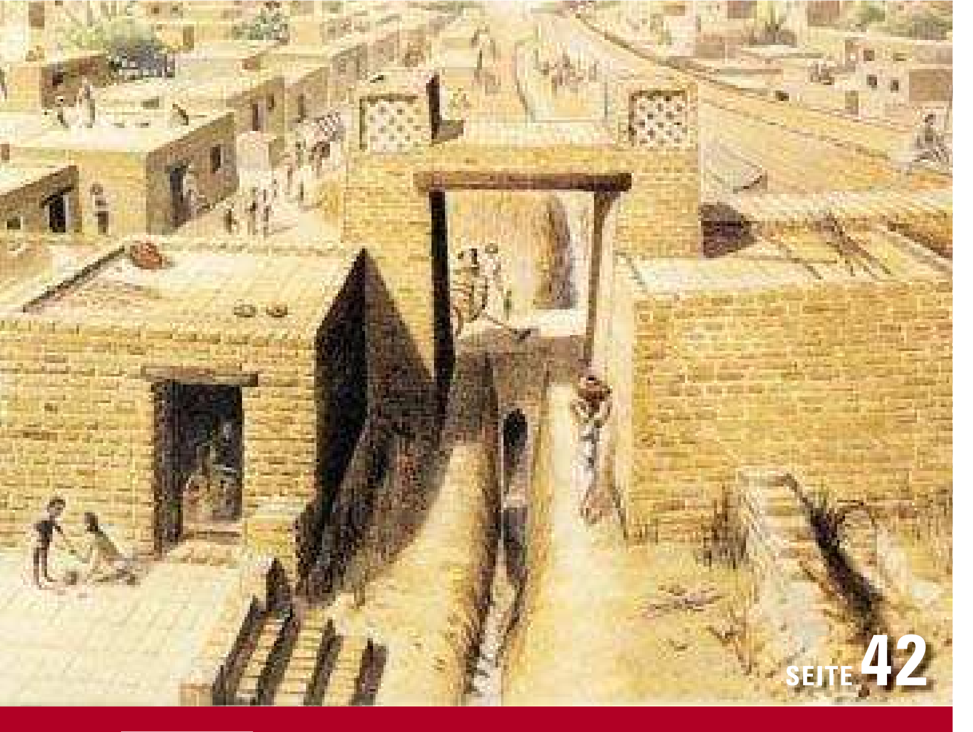
SEITE 58

RAUMFAHRT

Rückkehr zum Mond

Die Mondforschung erlebt eine Renaissance: Mit ausgefeilter Technik erkunden unbemannte Sonden den Erdtrabanten und fahnden nach Wassereis.





TITELTHEMA **INDUSKULTUR**

Harappa – Stadt der Händler

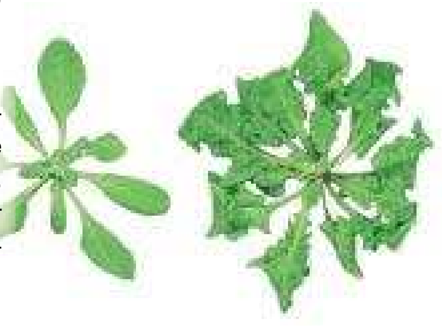
Zeitgleich mit Ägypten und Mesopotamien entwickelten sich im Industal blühende Metropolen. Doch verzichteten ihre Fürsten auf militärische Macht und sorgten stattdessen für eine florierende Wirtschaft.

SEITE 68

UNSICHTBARES GENOM I

Preziosen im DNA-Schrott

In scheinbar nutzlosen Teilen der Erbsubstanz verbirgt sich offenbar eine hochkomplexe Informationsebene. Um sie geht es im ersten Artikel dieser zweiteiligen Serie über das »unsichtbare« Genom.



SEITE 76

GEOLOGIE

Schwarzes Gold vom Meeresgrund

Geologen können heute nachvollziehen, wie die Öl- und Gasvorkommen unter dem Südatlantik entstanden sind. Damit helfen sie den Mineralölfirmen, unter der Tiefsee neue Lagerstätten zu orten und auszubeuten.



SEITE 86

LOGIK

Grenzen der Berechenbarkeit

Unsere Erkenntnismöglichkeiten sind prinzipiell beschränkt; das sagt uns Gödels Unvollständigkeitssatz. Aber die Grenzen sind nicht fassbar.

F E B R U A R   2 0 0 4

REZENSIONEN

PHYSIKALISCHE UNTERHALTUNGEN

KOMMENTARE

WISSENSCHAFT IM ...

WEITERE RUBRIKEN

SPEKTRUM-PLUS.DE
ZUSATZANGEBOT NUR FÜR ABONNENTEN

Mehr als ein Bewusstsein

Der Umgebung, der eigenen Gedanken, des eigenen Ichs bewusst zu sein, überhaupt Bewusstsein zu besitzen – das Phänomen hat viele Facetten. Wie weit lässt es sich mit Mitteln der Biologie untersuchen?

ZUGÄNGLICH ÜBER WWW.SPEKTRUM-PLUS.DE NACH ANMELDUNG MIT ANGABE DER KUNDENNUMMER

Krank aus der Retorte

Dezember 2003

Maßlos überzogen

In diesem Falle hat Spektrum für meinen Geschmack zu viel in die Trickkiste der Bild-Zeitung gegriffen. Wenn als Titelbild erscheint: »Krank aus der Retorte« und man dann die Missbildungszahlen im Artikel und im Interview liest, erscheint das doch maßlos überzogen und schlichtweg falsch.

Für Deutschland wird bei der In-vitro-Fertilisation eine Missbildungsrate von 2,4 Prozent angegeben, vergleichbar mit der Missbildungsrate bei Normalgeburten. Bei der intracytoplasmatischen Spermieninjektion liegt die Rate geringfügig höher als bei Normalbefruchtung (3,4 Prozent). Das sind die Daten für Deutschland von Prof. Diedrich. Dabei von »kranken Retortenkindern« zu sprechen, ist eine falsche Information. So verunsichert man prospektive Eltern.

Prof. Edda Siegl, Rostock

Erbkrankheiten bei Retortenkindern

»Oft ist das Denken schwer, indes – Das Schreiben geht auch ohne es.« (Wilhelm Busch)

Die hier vorgestellten Untersuchungen setzen anscheinend ausnahmslos voraus, dass zumindest die (biologischen) Eltern dieser Kinder eine repräsentative Stichprobe der Gesamtbevölkerung sind, sodass entsprechende Erkrankungsraten unmittelbar verglichen werden können.

Das ist aber sicher nicht der Fall. Einzig die Frage des Durchschnittsalters der Eltern wird andiskutiert, welches sicher einen indirekten Hinweis auf erhöhte Risiken gibt. Denn selbstverständlich muss das Alter der Eltern von »Retortenkindern« im Mittel höher sein, weil die meisten Interessierten ja schon jahrelang vergeblich auf natürlichem Weg versucht haben, ein Kind zu bekommen, also in einem Alter, wo die Vergleichsgruppe »Durchschnittsbevölkerung« durchaus erfolgreich ist.

Schlimm ist aber, wenn nicht einmal stutzig macht, dass auch Erbkrankheiten bei Retortenkindern verstärkt auftreten sollen. Der einzige Mechanismus, der mir plausibel erscheint: Eltern von Retortenkindern haben im Vergleich zur Normalbevölkerung einen besonders ausgeprägten Kinderwunsch und werden daher eventuelle Kenntnisse über erbliche Belastungen in der Verwandtschaft bevorzugt verharmlosen oder verdrängen, in jedem Fall aber dem behandelnden Arzt mit höherer Wahrscheinlichkeit als in der durchschnittlichen Bevölkerung verschweigen, um nicht das ganze Unternehmen zu gefährden.

Dr. Hans-Joachim Stortnik, Kirchdorf a. Inn

Wegen der gesundheitlichen Risiken sollte die künstliche Zeugung die Ausnahme bleiben.

RYSZARD HOROWITZ / CORBIS

Briefe an die Redaktion …

… richten Sie bitte mit Ihrer vollständigen Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft
Ursula Wessels
Postfach 10 48 40
69038 Heidelberg

E-Mail: wessels@spektrum.com
Fax: (0 62 21) 91 26-729

Bedrohte Seepferdchen

Dezember 2003

Der Artikel suggeriert, dass das Fortpflanzungsverhalten der Seepferdchen erst Mitte der 1980er Jahre bekannt wurde. Aber schon Ringelnatz, der 1934 verstarb, beschrieb das Paarungsverhalten in seinem Gedicht »Seepferdchen«:

Als ich noch ein Seepferdchen war, – Im vorigen Leben, –Wie war das wonnig, wunderbar – Unter Wasser zu schweben. – In den träumenden Fluten – Wogte, wie Güte, das Haar – Der zierlichsten aller Seestuten, – Die meine Geliebte war. – Wir senkten uns still oder stiegen, – Tanzten harmonisch umeinand, – Ohne Arm, ohne Bein, ohne Hand, – Wie Wolken sich in Wolken wiegen. – Sie spielte manchmal graziöses Entfliehn, – Auf dass ich ihr folge, sie hasche, – und legte mir einmal im Ansichziehn – Eierchen in die Tasche. – usw.

Karin und Hans-Dieter Rott, Erlangen

Zuerst kam die Feder

Oktober 2003

Die Frage nach dem »Wozu« der Befiederung, vor allem der vorderen Gliedmaßen, könnte sich aus deren Gebrauch als Balancierstange beantworten lassen: Balancebedürftige Zweibeiner, Menschenkinder beim Laufenlernen, Vogelküken, wenn sie schnell laufen, breiten heute noch ihre vorderen Gliedmaßen aus. Im Gleichgewicht läuft es sich sicherer und schneller. Das Titelbild gibt den ziemlich drastischen Begriff eines großen Zweibeiners mit dem fragwürdigen Gleichgewicht des Hans Huckebein nach dem Genuss von Likör.

Schwungfedern an den vorderen Gliedmaßen begünstigen aerodynamisch sicheren und schnelleren Lauf, dann folgen weite Sprünge, bergab (oder baumab) Gleitflug und Archaeopterix. Es sei dabei nur von der Schwungfeder beim Saurier die Rede. Wo deren Entwicklung ausbleibt oder die Vordergliedmaßen gar verkümmern (zum Beispiel beim *Tyrannosaurus Rex*), entsteht kein flinker Jäger (oder Flüchter), sondern ein torkelnder Aasfresser.

Dr. Hansrudolf Hartung, Rösrath

Das Zeitalter der Menschenaffen

Dezember 2003

Das sollten Sie nicht tun: Unter der Überschrift »Auch einige ernsthafte Wissenschaftler …« im Kasten auf Seite 64 »Der Yeti – Mythos und Wirklichkeit« bringen Sie ein Bild von einem »Riesenfußabdruck« ohne jede Distanzierung. Dabei ist deutlich zu sehen, dass es sich hier um einen Scherz handelt. Am Strand stelle ich für meine Enkel solche Abdrücke mit Unterarm, Handballen und Fingern her, übrigens auch kleine von Engeln. Die haben aber nur vier Zehen; dafür hinterlassen sie beim Auffliegen Spuren der Schwungfedern im Sand. Soll ich Ihnen davon Bilder zur Veröffentlichung unter »Anthropologie« schicken? Als Beitrag zur Evolution der Hominiden?

Prof. Dieter Meischner, Göttingen

Die Kerze

Wissenschaft im Alltag, Dezember 2004

Ein kleines Experiment zeigt, dass sich die glühenden Rußteilchen nicht gleichmäßig über den Querschnitt der Kerzenflamme verteilen.

Hierzu wird eine brennende Kerze in hellem Sonnenlicht aufgestellt. Zusätzlich wird die Leuchtdichte des

Sonnenlichts mittels einer großen Leselupe weiter erhöht, deren »Brennfleck« oberhalb des Dochts in die Kerzenflamme ausgerichtet wird. An den Rändern der ruhig brennenden Flamme zeigen sich zwei helle Flecken, weil die Rußteilchen jetzt von intensivem Sonnenlicht beleuchtet werden. Der Abstand der Flecken entspricht ungefähr dem Durchmesser der Flamme. Das Flammeninnere selbst ist transparent.

Martin Romann, Clausthal-Zellerfeld

Paralleluniversen

Nachgehakt, Dezember 2003

Ich glaube, Herr Springer macht es sich zu einfach, wenn er die Reaktionen auf die Artikel von Tegmark und Bekenstein mit den Reaktionen auf Galilei und Bruno in einen Topf wirft.

Schon die Artikel von Bekenstein und Tegmark sind nicht zu vergleichen. Ich hatte jedenfalls mit dem Artikel von Tegmark kein Problem. Dass ich jetzt hier vor diesem Bildschirm sitze und Ihnen schreibe, ist Ergebnis einer Fülle von Entscheidungen, die auch anders hätten ausfallen können. Vermutlich würde bereits das Hineinlaufen in einen einzigen anderen Entscheidungszweig bedeuten, dass ich entweder gar nicht existieren würde oder gerade etwas anderes zu tun hätte. Die in meiner Realität nicht beschrittenen Pfade anderen Welten zuzuordenen und hierfür ein Konstrukt zur Verfügung zu stellen, erscheint mir eigentlich nicht abwegig, sondern eher sinnvoll. Auch wenn ich die Welt, in der ich als Multimillionär den Luxus genieße und meine Sekretärin gerade diesen Leserbrief schreibt, wohl nie erreichen werde.

Anders der Artikel von Bekenstein. Wobei ich mich nicht gegen seine grundlegende Idee wende, sondern gegen seine Schlussfolgerung.

Und hier bin ich Springer fast dankbar, dass er zum Vergleich auf das dunkle Kapitel der frühen Neuzeit zurückkommt. Es gab nämlich einen Mann namens Kolumbus, der die Theorie, die Erde sei keine Scheibe, sondern eine Kugel, beim Wort nahm und Amerika – wieder? – entdeckte. Er schuf mithin für die eigentlich durch pures Sehen schwer entscheidbare Frage, ob die Erde eine Scheibe oder eine Kugel sei, ein Evidenzkriterium.

Tomas Schweigert, Bergisch-Gladbach

Mikro, Nano, Opto

Innovation in Deutschland, November 2003

In der Einleitung dieses Artikels ist Hubertus Christ ein Sachfehler unterlaufen:

Die erste elektrische Glühlampe wurde nicht 1879 von Thomas Alva Edison, sondern bereits 1854 von Heinrich Goebel (aus Springe bei Hannover) zum Leuchten gebracht.
http://www.wissen.swr.de/warum/gluehlampe/themenseiten/t3/s2.html
http://www.springe.de/goebel-broschuere.htm

Bernd Kappenberg, Hannover

Ein Universum voll dunkler Rätsel

Dezember 2004

Im Untertitel zu diesem Artikel schreiben Sie von den enormen Fortschritten der Kosmologie in den letzten 25 Jahren. Und doch fällt es mir nach der Lektüre des Beitrags schwer, an Fortschritt zu denken. Vielmehr fühle ich mich an den zitierten Fred Hoyle erinnert, der als Kritiker der Urknall-These gern den Vergleich zur Epizykeltheorie der Planetenbewegung in der Antike zog. Wie kann von Fortschritt gesprochen werden, wenn immer neue Kaninchen aus dem Hut gezaubert werden müssen – Inflation, Dunkle Materie, Dunkle Energie –, um eine These zu stützen, die in hohem Maße unphysikalisch ist: Die Geburt des Weltalls aus einer Singularität.

EUROPÄISCHE SÜDSTERNWARTE ESO

Moderne Großteleskope ermöglichen den Blick auf ferne Galaxien (hier: 1ES0657–55).

Vielleicht wäre es für die (meisten) Kosmologen an der Zeit, einzuhalten und sich kritischer mit ihren eigenen Theorien auseinander zu setzen und auch andere Wege stärker zu beachten.

Hermann Fenger-Vegeler, Bielefeld

Karikatur

Dezember 2004

Seite 31: »Wissenschaftler haben eindeutige Beweise dafür gefunden, dass unser Universum nicht existiert!« OH ist einfach wunderbar.

Bernd Neelen, per E-Mail

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Stellvertretende Chefredakteure: Dr. Inge Hoefer (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
Redaktion: Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe (Online Coordinator), Dr. Uwe Reichert, Dr. Adelheid Stahnke; E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Schlussredaktion: Christina Peiberg (kom. Ltg.), Sigrid Spies
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Gabriela Rabe
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Natalie Schäfer
Redaktionsassistenz: Eva Kahlmann, Ursula Wessels
Redaktionsanschrift: Postfach 104840, D-69038 Heidelberg, Tel. (06221) 9126-711, Fax (06221) 9126-729
Verlag: Spektrum der Wissenschaft, Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 104840, D-69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, D-69126 Heidelberg, Tel. (06221) 9126-600, Fax (06221) 9126-751
Verlagsleiter: Dr. Carsten Könneker, Tel. (06221) 9126-770
Geschäftsleitung: Thomas Bleck, Markus Bossle
Büro Bonn: G. Hartmut Altenmüller, Tel. (02244) 4303, Fax (02244) 6383, E-Mail: ghalt@aol.com
Korrespondenten: Dieter Beste, Marion Kälke, Tel. (0211) 9083357, Fax (0211) 9083358, E-Mail: Dieter.Beste@t-online.de
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. (06221) 9126-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. (06221) 9126-741, E-Mail: marketing@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. (06221) 9126-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Markus Fischer, Bernhard Gerl, Dr. Rainer Kayser, Albrecht Kunkel, Dr. Susanne Lipps-Breda, Dr. Maria Reményi, Katrin Schaller, Dr. Michael Springer.
Leser- und Bestellservice: Tel. (06221) 9126-743, E-Mail: marketing@spektrum.com
Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft, Boschstraße 12, D-69469 Weinheim, Tel. (06201) 6061-50, Fax (06201) 6061-94
Bezugspreise: Einzelheft € 6,90/sFr 13,50; im Abonnement € 75,60 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 65,40. Die Preise beinhalten € 6,00 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 6,00 Porto-Mehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konten: Deutsche Bank, Weinheim, 58 36 43 202 (BLZ 670 700 10); Postbank Karlsruhe 13 34 72 759 (BLZ 660 100 75)
Anzeigen: GWP media-marketing, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung Anzeigen: Harald Wahls; Anzeigenleitung: Sibylle Roth, Tel. (0211) 887-2379, Fax (0211) 887-2399; verantwortlich für Anzeigen: Gerlinde Volk, Postfach 10 26 63, D-40017 Düsseldorf, Tel. (0211) 887-2376, Fax (0211) 37 49 55
Anzeigenvertretung: Berlin: Dirk Schaeffer, Friedrichstraße 150–152, D-10117 Berlin, Tel. (030) 61686150, Fax (030) 6159005, Telex 114810; Hamburg: Michael Scheible, Burchardstraße 17, D-20095 Hamburg, Tel. (040) 30183/-183/-194, Fax (040) 339090; Düsseldorf: Klaus-P. Barth, Werner Beyer, Kasernenstraße 67, D-40213 Düsseldorf, Postfach 102663, D-40017 Düsseldorf, Tel. (0211) 30135-2060, Fax (0211) 133974; Frankfurt: Anette Kullmann, Annelore Hehemann, Eschersheimer Landstraße 50–54, D-60322 Frankfurt am Main, Tel. (069) 2424-4536, Fax (069) 2424-4555; Stuttgart: Norbert Niederhof, Königstraße 20, D-70173 Stuttgart, Tel. (0711) 22475-40, Fax (0711) 22475-49; München: Bernd Schwetje, Josephspitalstraße 15, D-80331 München, Tel. (089) 545907-14, Fax (089) 545907-16
Druckunterlagen an: GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, D-40213 Düsseldorf, Tel. (0211) 887-2387, Fax (0211) 374955
Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 25 vom 01.01.2004.
Gesamtherstellung: Konradin Druck GmbH, Leinfelden-Echterdingen

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN
415 Madison Avenue, New York, NY 10017-1111
Editor in Chief: John Rennie, Publisher: Bruce Brandfon, Associate Publishers: William Sherman (Production), Lorraine Leib Terlecki (Circulation), Chairman: Rolf Grisebach, President and Chief Executive Officer: Gretchen G. Teichgraeber, Vice President: Frances Newburg

SPEKTROGRAMM

PALÄONTOLOGIE

Letzter Schnappschuss vor dem Verdrängungskampf

Rund 27 Millionen Jahre alte Fossilien zahlreicher Säugetiere kamen jetzt im Hochland Äthiopiens zu Tage. Die Funde in der Region Chilga werfen ein Schlaglicht auf die Tierwelt Afrikas, kurz bevor der Schwarze Kontinent vor etwa 24 Millionen Jahren mit Eurasien zusammenstieß. Nach der Kollision setzte ein reger Artenaustausch ein, bei dem ein großer Teil der urtümlichen afrikanischen Faunen verschwand. Die letzten bekannten fossilen Zeugnisse dieser Tierwelt – etwa in der ägyptischen Oase Fayum – waren bisher durchweg älter als 32 Millionen Jahre. Die Chilga-Fauna schließt die Überlieferungslücke aus der Spätzeit der Isolation Afrikas. Besonders häufig sind Rüsseltiere und die mit ihnen verwandten Schliefer, von denen wenige kaningroße Arten bis heute überdauert haben. Daneben feiert eine damals schon totgeglaubte Art fröhliche Urständ: das *Arsinoitherium* (Bild). All diese afrikanischen Sonderentwicklungen standen zur Chilga-Zeit offenbar noch in voller Blüte, bevor die eurasischen Invasoren – etwa Nashörner und wiederkäuende Huftiere – einen erbitterten Verdrängungskampf gegen sie führten. Aber nicht alle afrikanischen Säuger gehörten zu den Verlierern. So breiteten sich die Rüsseltiere mit vielen neuen Arten – darunter das Mammut – über die nördlichen Kontinente bis nach Südamerika aus, bevor sie gegen Ende der Eiszeit mit Ausnahme der Elefanten allesamt ausstarben. *(Nature, 4.12.2003, S. 509 und 549)*



Vor 27 Millionen Jahren noch quicklebendig: das afrikanische *Arsinoitherium*. Dann jedoch musste es den nicht mit ihm verwandten Nashörnern aus Eurasien weichen.

PALÄANTHROPOLOGIE

Steinmaske eines Neandertalers

Kunst gilt weithin als Monopol des *Homo sapiens*. Aber ein neuer Fund offenbart nun auch beim Neandertaler eine bislang nicht vermutete musische Ader. Im Schutt vor einer Höhle an der Loire fand sich in Verbindung mit Steinwerkzeugen, die von Experten übereinstimmend Neandertalern zugeschrieben werden, eine 35000 Jahre alte Steinmaske, die auf Anhieb als Gesicht erkennbar ist. Es handelt sich um einen zehn Zentimeter langen Feuerstein, der schon von Natur aus ähnlich geformt war wie ein menschliches Antlitz. Der urzeitliche Künstler half jedoch nach, indem er die Gesichtszüge stärker herausarbeitete und zusätzlich einen siebeneinhalb Zentimeter langen Knochensplitter durch eine natürliche Öffnung im Stein trieb. Dadurch gelang es ihm, den Eindruck von friedlich geschlossenen Augen zu erwecken. Beschrieben haben das Objekt der Konservator Jean-Claude Marquet vom Prähistorischen Museum von Grand-Pressighy und der Anthropologe Michel Lorblanchet. Wie sie berichten, lässt sich ausschließen, dass der Knochen zufällig an seinen Platz geriet; denn er ist mit zwei winzigen Steinkeilen fixiert. *(Antiquity, Nr. 77, S. 661)*.

JEAN-CLAUDE MARQUET

◀ Diese 35000 Jahre alte Maske stammt offenbar von der Hand eines Neandertalers.



LINGUISTIK

Sprachstammbaum im Computer

Keltisch, Germanisch, Slawisch, Romanisch, Griechisch, Nordindisch, Iranisch und Armenisch – sie alle gehören zu den indoeuropäischen Sprachen, der größten Sprachfamilie der Welt mit einem Verbreitungsgebiet zwischen Irland und Indien. Über ihren Ursprung rätseln Historiker schon seit langem. Die einen sehen die Wurzel in kriegerischen Reiterhorden aus Zentralasien, die bei weiträumigen Eroberungszügen vor 6000 Jahren ihr Idiom verbreiteten. Für die anderen waren es Bauern aus Anatolien, die sich mit ihren fortschrittlichen landwirtschaftlichen Methoden vor noch längerer Zeit langsam über ganz Europa ausdehnten. Dieser zweiten Fraktion leisten Russel Gray und Quentin Atkinson von der Universität Auckland (Neuseeland) nun Schützenhilfe. Sie benutzten Computermodelle aus der Evolutionsbiologie, um 87 Sprachen miteinander zu vergleichen und ihre gemeinsamen Ursprünge zu ergründen. Das Ergebnis: Proto-Indoeuropäisch entstand im Zeitraum vor 9800 bis 7800 Jahren im Gebiet der heutigen Türkei und breitete sich ab etwa 6000 v. Chr. – offenbar zusammen mit dem Ackerbau – über Europa und Südasien aus. Auf dem Weg nach Westen und Osten fächerte es sich dabei sukzessive in die einzelnen indoeuropäischen Sprachen auf. So spaltete sich schon vor 8700 Jahren das einst in der Türkei gesprochene Hethitisch ab. Vor 7300 Jahren folgten Griechisch und Armenisch, vor 6900 Jahren Albanisch sowie Persisch und Sanskrit. Noch einmal 400 Jahre später verselbstständigten sich die slawischen Sprachen, und erst vor 5500 Jahren trennten sich schließlich der germanische und der romanische Zweig. *(Nature, Bd. 426, S. 435)*

ANTIBIOTIKA-RESISTENZ

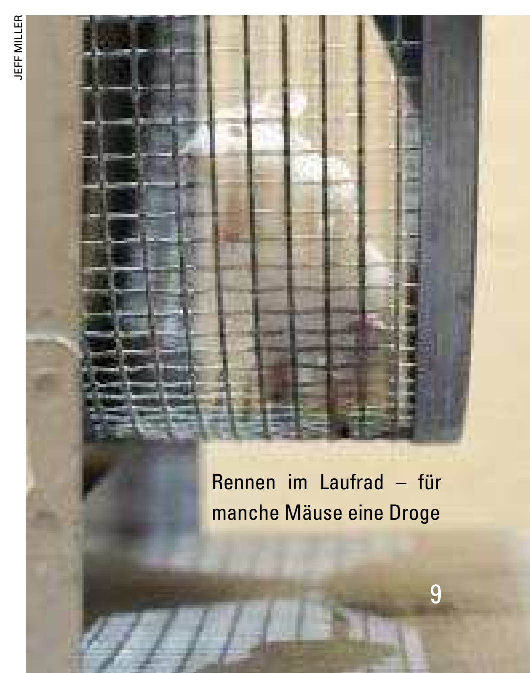
Bedenkliche Bakterienbomben

Erschreckende Einblicke in den hygienischen Zustand von Geflügelfleisch und die Verbreitung von Antibiotika-Resistenzen lieferten nun Forscher des Schweizer Bundesveterinäramtes. Sie untersuchten 415 Proben von 122 Verkaufsstellen in der Schweiz und Liechtenstein auf Befall mit *Campylobacter*-Bakterien, die zwar nicht zu den übelsten Krankheitskeimen zählen, aber Darmentzündungen oder gar Blutvergiftungen hervorrufen können. Im Hintergrund stand die Frage, inwieweit die in der Tierhaltung verbreitete Fütterung von Antibiotika die Resistenz der Bakterien begünstigt. Tatsächlich erwiesen sich 91 Fleischproben, also ein gutes Fünftel, als verseucht. In 36 Fällen waren die Erreger gegen mindestens ein Antibiotikum resistent. 17 Proben enthielten Bakterien mit Mehrfachresistenzen. Dabei ließ sich kein signifikanter Unterschied zwischen konventioneller und artgerechter Tierhaltung feststellen. *(BMC Public Health, Nr. 3, S. 39)*

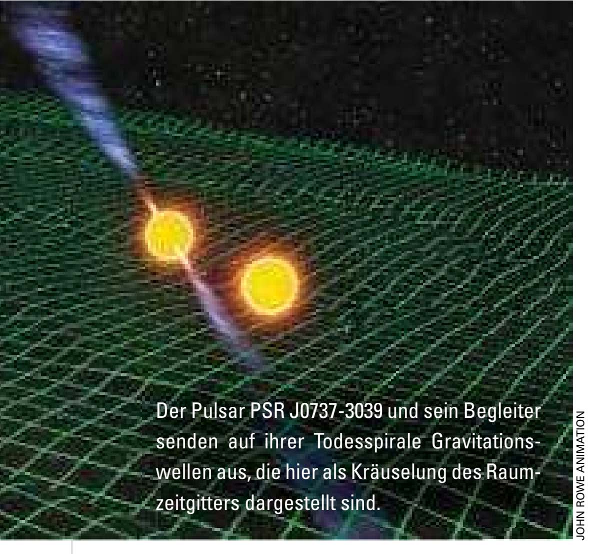
NEUROLOGIE

Süchtig machender Sport

Drogen und Computerspiele, Internet und Sex, Fernsehen und Kaufrausch: Die Liste der Suchtauslöser ist lang und bunt gemischt. Muss man nun auch den Sport hinzurechnen? Ein Forscherteam um Justin Rhodes von der Oregon Health and Science University in Portland fand jedenfalls bei Nagern, denen ihr gewohntes Lauftraining verwehrt wurde, typische Entzugserscheinungen. Als Versuchstiere dienten speziell gezüchtete Rennmäuse, die seit Generationen wie besessen in Laufrädern turnen und inzwischen vermutlich genetisch auf die Raserei programmiert sind. Sechs Tage lang durften sich die Tiere nach Herzenslust austoben, dann aber verordneten die Forscher der Hälfte von ihnen eine Zwangspause. Fünf Stunden später ermittelten sie bei beiden Versuchsgruppen im Gehirn die Konzentration von Produkten des *Fos*-Gens, die bei neuronaler Aktivität vermehrt gebildet werden. Dabei zeigten die am Joggen gehinderten Mäuse in bestimmten Hirnregionen extrem hohe Messwerte. Die gleichen Regionen sind aber auch bei drogenabhängigen Ratten aktiv, denen man ihr Suchtmittel entzogen hat. Ganz offensichtlich brauchten die Mäuse den Sport als Stimulans. Die Frage ist nun, ob Joggen auch bei Menschen zur Sucht werden kann. *(Behavioral Neuroscience, 12/2003, S. 1243)*


JEFF MILLER

Rennen im Laufrad – für manche Mäuse eine Droge



Der Pulsar PSR J0737-3039 und sein Begleiter senden auf ihrer Todesspirale Gravitationswellen aus, die hier als Kräuselung des Raumzeitgitters dargestellt sind.

JOHN ROWE ANIMATION

KOSMOLOGIE

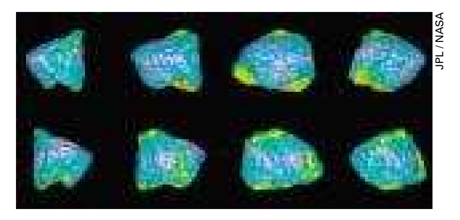
Todesballett zweier Neutronensterne

Wenn zwei Neutronensterne umeinander rotieren, strahlen sie Gravitationswellen ab. Der damit einhergehende Energieverlust zwingt sie auf eine Todesspirale, auf der sie sich immer weiter nähern und schließlich ineinander stürzen. Bei der Verschmelzung setzen sie dann einen gewaltigen Puls an Gravitationsstrahlung frei, der noch in 60 Millionen Lichtjahren Entfernung mit Detektoren wie Ligo, Virgo oder Geo, die derzeit in Betrieb gehen, nachweisbar sein müsste. Allerdings rechnete man bisher nur alle zehn bis zwanzig Jahre mit einer solchen Verschmelzung in unserer kosmischen Nachbarschaft. Nun hat Marta Burgay vom Astronomischen Institut der Universität Bologna ein Neutronensternpaar entdeckt, das mit einer Periode von weniger als zweieinhalb Stunden unerwartet rasch umläuft. Der Todeskuss von PSR J0737-3039 und seinem Begleiter dürfte »schon« in rund 85 Millionen Jahren stattfinden; das System mit der kürzesten bisher bekannten Restlebensdauer braucht dagegen noch 320 Millionen Jahre bis zum furiosen Finale. Zugleich sind die Radioemissionen des neu entdeckten Neutronendoppelsterns relativ schwach, was vermuten lässt, dass bisher viele derartige Objekte übersehen wurden. Das sind gute Nachrichten für die Gravitationswellenjäger: Ihre Ansitzzeit verkürzt sich dadurch wohl auf ein bis zwei Jahre. *(Nature, 4.12.2003, S. 531)*

ASTRONOMIE

Von der Sonne abgelenkt

Das Sonnenlicht übt nicht nur einen gleichmäßigen Strahlungsdruck auf kleine Körper im Planetensystem aus, sondern kann sie durch den so genannten Jarkowski-Effekt auch aus ihrer Bahn werfen. Das haben tschechische und amerikanische Wissenschaftler an dem Asteroiden 6489 Golevka nun erstmals nachgewiesen. Der Effekt beruht darauf, dass die von der Sonne aufgeheizte Oberfläche, nachdem sie bei der Rotation des Himmelskörpers auf die Nachtseite gelangt ist, immer noch Wärmestrahlung aussendet und so einen Rückstoß erzeugt. Dessen Richtung und Ausmaß hängt sowohl von der Bewegung des Asteroiden als auch von seinen geometrischen Eigenschaften und seiner stofflichen Zusammensetzung ab. Deshalb ist der Impuls sehr schwer kalkulierbar und bildet einen wesentlichen Unsicherheitsfaktor bei der Bahnbestimmung potenziell gefährlicher erdnaher Objekte. Die genaue Gestalt und Rotation von 6489 Golevka war aus Radaruntersuchungen bei früheren Annäherungen sehr gut bekannt. In seinem Fall konnten Steve Ostro vom Jet Propulsion Laboratory in Pasadena (Kalifornien) und seine Kollegen den Jarkowski-Effekt deshalb theoretisch berechnen. Tatsächlich war der Asteroid, als er im Mai 2003 erneut nah an der Erde vorbeiflog, um 15 Kilometer von seiner rein ballistischen Bahn abgekommen – in ausgezeichneter Übereinstimmung mit der Vorhersage. Die Forscher hoffen, in Zukunft den Spieß auch umdrehen und aus der Beobachtung von Bahnabweichungen auf Grund des Jarkowski-Effekts Rückschlüsse auf die Beschaffenheit von Asteroiden ziehen zu können. *(Science, 5.12.2003, S. 1739)*



JPL / NASA

▲ Computermodell des knapp 500 Meter großen Asteroiden 6489 Golevka nach Radardaten des Arecibo-Observatoriums

VERHALTEN

Stiefmutter ohne Einfluss

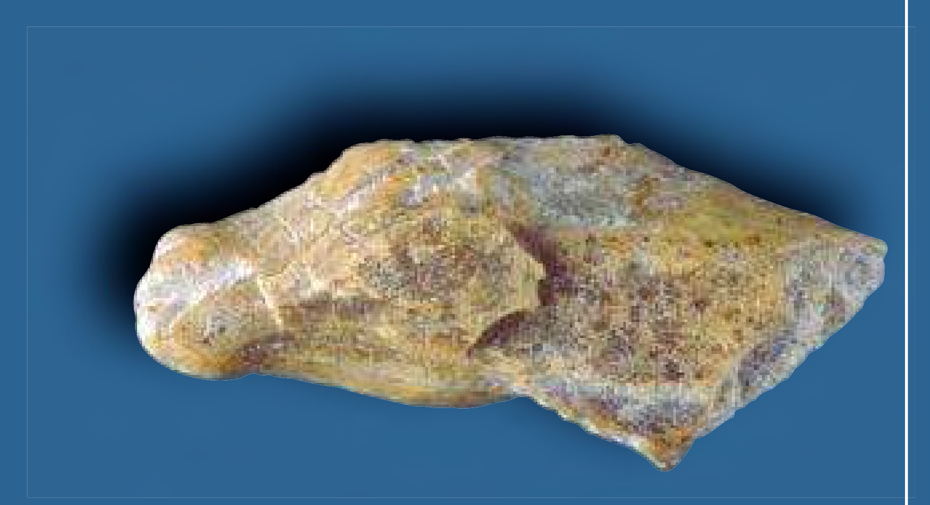
Was prägt den Charakter eines Menschen mehr: seine genetische Veranlagung oder das Umfeld, in dem er aufwächst? Über diese Frage tobt seit Jahrzehnten ein erbitterter Streit unter Sozialwissenschaftlern. Nun hat Dario Maestripieri von der Universität Chicago bei Tieren nach der Antwort gesucht. Dazu vertauschte er die neugeborenen Töchter weiblicher Rhesusaffen und beobachtete, wie sich die Kleinen im Laufe der folgenden drei Jahre entwickelten. Würden sie eher nach ihrer leiblichen Mutter geraten oder nach ihrer Stiefmutter? Um das herauszufinden, beschränkte sich Maestripieri auf ein einfaches, objektiv bestimmbares Kriterium: Er beobachtete, wie häufig die Jungen gegenüber Artgenossen aggressiv oder freundlich auftraten. Das Ergebnis war überraschend eindeutig: Das Verhalten der kleinen Rhesusaffenweibchen ähnelte in frappierender Weise dem der leiblichen Mutter, während es so gut wie keine Gemeinsamkeiten mit der jeweiligen Stiefmutter gab. Deren Vorbildfunktion war offenbar minimal. Obwohl sich Affen und Menschen in ihrem Sozialverhalten ähneln, bleibt allerdings offen, inwieweit der Befund übertragbar ist – schließlich verfügen menschliche Mütter über ein weit reichhaltigeres Repertoire an Erziehungsmethoden als Primatenweibchen. *(Developmental Psychobiology, Nr. 43, S. 321).*

▼ Das Erbgut allein bestimmt das Verhalten der Jungen – auch bei diesen Rhesusaffen-Müttern.

STEVE ROSS









Eiszeitliche Elfenbeinschnitzereien

Die knapp fünf Zentimeter große Skulptur zeigt unverkennbar einen Wasservogel – eine fliegende Ente oder einen tauchenden Kormoran. Schnabel, Augen, Füße und Flügel, ja sogar die Federn hat der Künstler präzise aus dem Stoßzahn eines Mammuts herausmodelliert – und das vor 30 000 Jahren. Forscher der Universität Tübingen um Nicholas Conard haben die älteste bislang bekannte Darstellung eines Vogels zusammen mit einem Pferdekopf und einem knapp vier Zentimeter großen »Löwenmenschen« in der Höhle »Hohle Fels« bei Schelklingen auf der Schwäbischen Alb entdeckt. Sie nehmen an, dass die Figuren von anatomisch modernen Menschen gefertigt wurden; denn vieles spricht dafür, dass *Homo sapiens* schon vor fast 40 000 Jahren entlang des Donautals siedelte, als die Neandertaler bereits weitgehend aus der Region verschwunden waren. Der Löwenmensch ist gewissermaßen der kleinere Bruder einer schon früher entdeckten, rund dreißig Zentimeter großen Statue. Das Motiv lässt nach Ansicht der Forscher darauf schließen, dass Verwandlungen zwischen Menschen und Löwen zur mythologischen Vorstellungswelt der eiszeitlichen Bewohner des Donauraums gehörten.

NATURE, BD. 426; S. 830

ASTRONOMIE

Blitzstart für junge Planeten

Anhand von Meteoriten ließ sich die Aufheizung und Abkühlung eines Asteroiden vor 4,5 Milliarden Jahren zurückverfolgen. Die Rekonstruktion zeigt, dass die Staubscheiben junger Sterne nach wenigen Jahrmillionen bereits die Bausteine erdähnlicher Planeten enthalten.

Von Mario Trieloff

Vor etwa 4,5 Milliarden Jahren kollabierte eine interstellare Wolke aus Gas und Staub unter ihrer eigenen Schwerkraft. Dies war die Geburtsstunde unseres Sonnensystems. Nachdem sich die Protosonne im Zentrum des Nebels gebildet hatte, verbanden sich kleine Staubteilchen zu größeren Brocken und dann zu meter- bis kilometergroßen Objekten: den Planetesimalen. Diese ballten sich mit der Zeit schließlich zu den Planeten zusammen.

Zwischen Mars und Jupiter blieb der Akkretionsprozess jedoch auf der Stufe mehrerer hundert Kilometer großer Körper stehen. So bildete sich an der Grenze zwischen den erdähnlichen Planeten des inneren Sonnensystems und den äußeren Gasriesen der Asteroidengürtel. In ihm stoßen wegen der hohen »Verkehrsdichte« selbst heute noch Kleinplaneten zusammen und zerbrechen dabei. Trümmerstücke, welche ins innere Sonnensystem geschleudert werden, treffen dann manchmal auch auf die Erde und gehen hier als Meteoriten nieder. Solche Himmelsboten sind eine Fundgrube für die Astronomen – bergen sie doch hochinteressante Informationen über die Frühzeit des Sonnensystems.

Während sich die Planeten bei ihrer Akkretion stark aufheizten, blieben viele der kleineren Asteroiden so kalt, dass sie jene Teilchen, die als erste aus dem solaren Urnebel »kondensierten«, fast unverändert bewahrt haben: weiße zentimetergroße Gesteinseinschlüsse, die reich an Kalzium und Aluminium sind. Daneben enthalten solche urtümlichen Kleinplaneten oft so genannte Chondren: kleine, durch Schmelzprozesse im Urnebel gebildete Gesteinskügelchen, die bei der Akkretion mit aufgenommen wurden. Die von ihnen abstammenden Meteoriten werden deshalb Chondriten genannt.

Indizienbeweis nach Jahrmilliarden

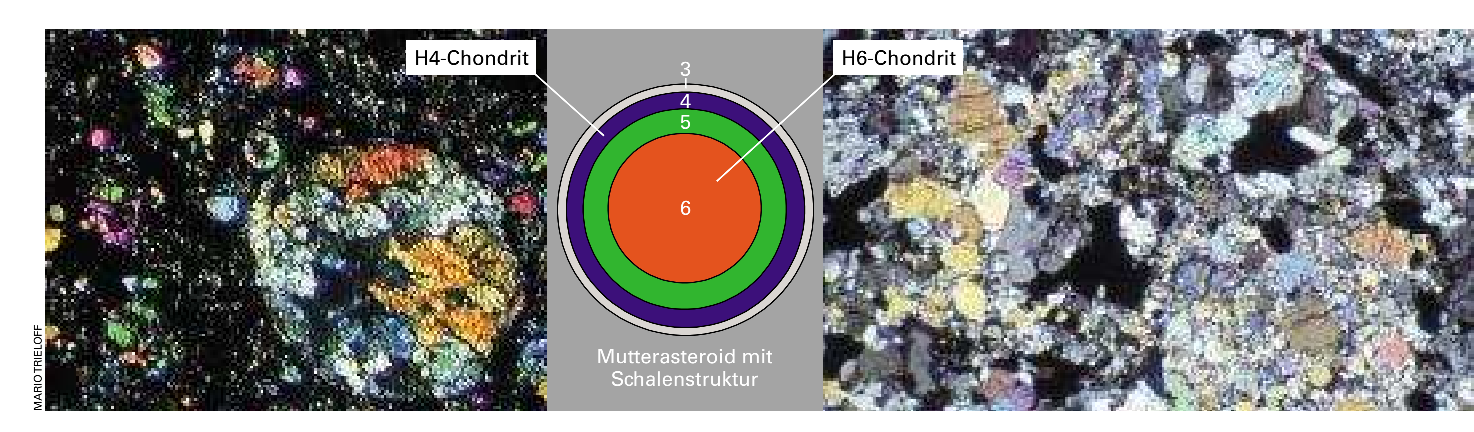
Andere, größere Asteroiden erhitzten sich dagegen so stark, dass sie schmolzen und sich wie die vier terrestrischen Planeten in einen Metallkern und einen Silikatmantel schieden oder differenzierten, wie Astronomen sagen. Der Grund dafür blieb lange Zeit rätselhaft. Die üblichen Wärmequellen kommen nicht in Frage. So kann der radioaktive Zerfall der langlebigen Isotope Kalium-40, Uran-238 und -235 sowie Thorium-232 ausschließlich große Planeten wirksam aufheizen, weil diese wegen ihres ungünstigen Umfang-Volumen-Verhältnisses die Zerfallswärme schlecht wieder loswerden. Auch der heftige Einschlag anderer Himmelskörper scheidet aus; denn er liefert gleichfalls nur bei großen Planeten im Endstadium des Akkretionsprozesses beträchtliche Energiemengen.

Mitte der 1970er Jahre wurde dann ein plausibler Kandidat für die mysteriöse Wärmequelle der Asteroiden entdeckt: das Radioisotop Aluminium-26, das mit einer Halbwertszeit von nur 0,7 Millionen Jahren in Magnesium-26 zerfällt und deshalb in kurzer Zeit viel Energie freisetzt. Tatsächlich fanden sich in kalziumaluminiumreichen Gesteinseinschlüssen des Allende-Meteoriten beträchtliche Überschüsse an dem Zerfallsprodukt Magnesium-26. Spätere Untersuchungen an anderen Meteoriten ergaben ähnliche Anomalien.

Dennoch fehlte der direkte Beweis, dass Asteroiden wirklich intern so aufgeheizt wurden, wie das geschehen sein musste, wenn Aluminium-26 als Wärmequelle fungierte. In diesem Fall sollten im Zentrum, wo sich die Wärme staut, die höchsten Temperaturen aufgetreten sein. Näher zur kalten Oberfläche hin wäre das Gestein dagegen nicht so heiß geworden und schneller abgekühlt.

So erstaunlich es klingen mag, aber auch nach 4,5 Milliarden Jahren lassen sich diese Vorgänge noch nachweisen. Dazu benötigt man im Prinzip nur Gestein aus unterschiedlichen Tiefen eines Asteroiden, wie es in Form von Meteoriten zu uns gelangt ist. Allerdings darf der Mutterkörper nicht so heiß geworden sein, dass er aufschmolz; denn dann hätte sich sein Material umverteilt (und etwa einen Eisenkern im Zentrum gebildet). Als aussichtsreichste Kandidaten für die Rekonstruktion der thermischen Frühgeschichte von Asteroiden erscheinen »gewöhnliche« Chondriten, weil einige davon fast bis an den Schmelzpunkt erhitzt wurden, andere dagegen viel weniger.

Von ihnen gibt es drei Klassen, die sich unter anderem in ihrem Eisengehalt und Oxidationsgrad unterscheiden. Man weiß, dass sie von drei verschiedenen Asteroiden stammen. Nur die Vertreter der



WILLIAM K. HARTMANN

Nach der Bildung der Sonne ballten sich vor rund 4,5 Milliarden Jahren die Teilchen in der protoplanetaren Gas- und Staubscheibe zunächst zu meter- bis kilometergroßen Objekten zusammen, deren Relikte die Asteroiden sind. Das damalige Aussehen des Sonnensystems ist hier in künstlerischer Vision dargestellt.

Klasse mit hohem Eisengehalt – die so genannten H-Chondriten – eignen sich für den erwähnten Nachweis, weil der zugehörige Mutterkörper unter relativ schonenden Bedingungen in metergroße Brocken zerbrochen ist. In den anderen beiden Asteroiden haben heftige Kollisionen die Spuren der ursprünglichen Aufheizung und Abkühlung nachträglich ausgelöscht.

Fossile Thermometer

Tatsächlich konnten Jens Hopp und ich am Mineralogischen Institut der Universität Heidelberg kürzlich Abkühlkurven für verschiedene H-Chondriten ermitteln – in Zusammenarbeit mit Kollegen des Naturhistorischen Museums in Paris, des Instituts für Planetologie in Münster und des Max-Planck-Instituts für Kernphysik in Heidelberg. Dabei bestätigte sich, dass die am stärksten erhitzten Exemplare, die aus den innersten Regionen des Mutterasteroiden stammten, einst auch am langsamsten erkalteten: Im Extremfall dauerte es 160 Millionen Jahre, bis die Temperatur von 950 auf etwa 120 Grad Celsius gesunken war. Dagegen kühlten die nur auf maximal 750 Grad Celsius erhitzten Chondriten innerhalb weniger Millionen Jahre ab.

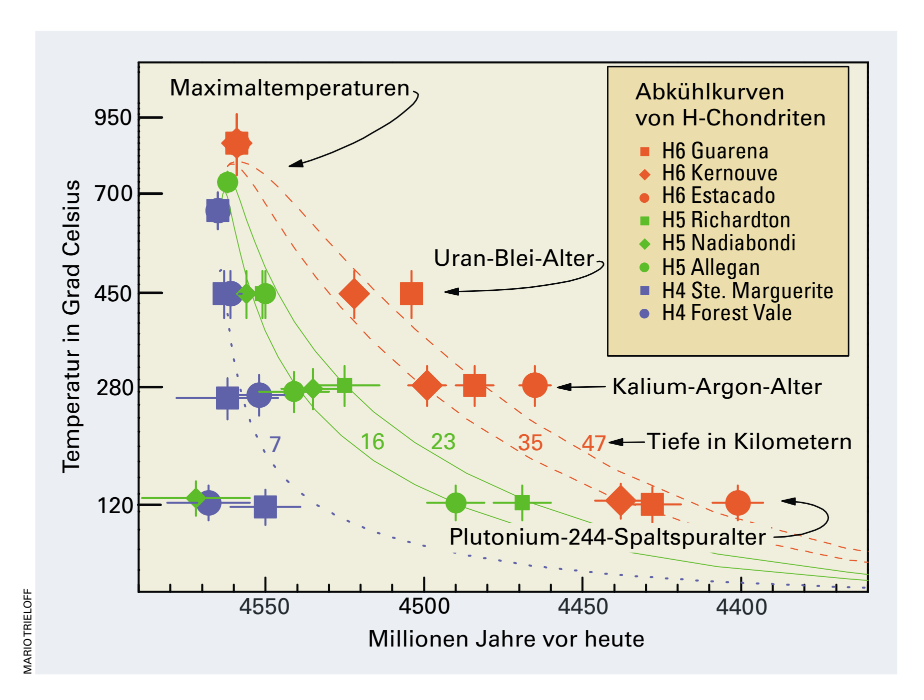
Für die Rekonstruktion der thermischen Geschichte verwendeten wir hochpräzise radiometische Datierungsmethoden, die jeweils das Unterschreiten einer bestimmten, relativ niedrigen Temperatur registrieren. So bedeutet ein Kalium-40/Argon-40-Alter von 4,5 Milliarden Jahren nicht, dass das Gestein seit dieser Zeit existiert, sondern dass es damals eine kritische Temperatur (etwa 280 Grad Celsius) unterschritt, ab der das gasförmige Zerfallsprodukt Argon-40 nicht mehr aus ihm entweichen konnte und sich deshalb anreicherte. Je mehr davon relativ zum Mutterisotop Kalium-40 vorhanden ist, desto früher war das Gestein also unter 280 Grad Celsius abgekühlt.

Analog liefert das Plutonium-244-Spaltspur-Alter den Zeitpunkt, zu dem die Strahlenschäden, die der Zerfall von Plutonium-244 im Mineralgitter hervorrief, nicht mehr durch die Wärmebewegung der Atome ausgeheilt werden konnten. Sie blieben erhalten und lassen sich durch Anätzen als Spaltspuren sichtbar machen. Je höher die Dichte dieser Spuren, desto früher waren demnach zum Beispiel Phosphat-Minerale unter 120 Grad Celsius abgekühlt.

Für jeden untersuchten Chondriten ermittelten wir auf diese Weise mit verschiedenen radiometrischen Uhren, wann seine Temperatur jeweils unter einen bestimmten Wert sank. Das Ergebnis war eindeutig: Die erhaltenen Abkühlkurven stimmten sehr gut mit denen aus einem Modell überein, das unterstellt, dass der Mutterkörper schon zwei bis drei Millionen Jahre nach Bildung der ersten Kondensate seine endgültige Größe erreicht hatte. Zu diesem Zeitpunkt waren noch bedeutende Mengen an Aluminium-26 vorhanden. Durch ihren Zerfall heizte sich der Asteroid auf und kühlte dann entsprechend den physikalischen Eigenschaften von chondritischem Gestein – insbesondere seiner Wärmeleitfähigkeit – in unterschiedlichen Tiefen unterschiedlich schnell ab.

Die neuen Untersuchungen liefern so den letzten Beweis dafür, dass Aluminium-26 wirklich die Wärmequelle für die Kleinplaneten war. Aber sie zeigen noch ▷

Bestimmte Meteoriten – so genannte H-Chondriten – sind auf der Erde gelandete Materialproben aus unterschiedlichen Tiefen eines zerborstenen Asteroiden, der sich in seinem Zentrum einst fast bis zum Schmelzpunkt aufgeheizt hatte. Sie enthalten »eingefrorene« Spuren der thermischen Geschichte ihres Mutterkörpers, in deren Verlauf dieser eine Schalenstruktur bildete. Gezeigt sind Dünnschliffe zweier H-Chondriten, deren Farbmuster im Polarisationsmikroskop die enthaltenen Minerale erkennen lässt.



Die Analyse von bestimmten Isotopenverhältnissen oder Spaltspuren in unterschiedlichen H-Chondriten zeigt, wann die Temperatur in der zugehörigen Schale des Mutterasteroiden jeweils einen definierten Schwellenwert unterschritt. Die Ergebnisse passen sehr gut zu theoretischen Abkühlkurven für verschiedene Tiefen eines Asteroiden, der durch radioaktiven Zerfall von Aluminium-26 aufgeheizt wurde.

mehr. Die untersuchten Meteoriten stammen von einem undifferenzierten chondritischen Asteroiden. Diese machen den Hauptteil der Objekte im Asteroidengürtel aus und waren daher wohl auch die wichtigsten Bausteine für terrestrische Planeten. Die rekonstruierten Abkühlungskurven belegen jetzt, dass sich diese Bausteine schon sehr früh – nach zwei bis drei Millionen Jahren – zusammengeballt hatten, sonst wären sie nicht durch den Zerfall von Aluminium-26 aufgeheizt worden.

Damit steigt zugleich die Chance, dass auch erdähnliche Planeten außerhalb des Sonnensystems existieren. Wie Astronomen festgestellt haben, ist der feine Staub in den Gas- und Staubscheiben um junge Sterne schon nach etwa drei bis sechs Millionen Jahren verschwunden. Gasplaneten können sich innerhalb dieser Zeit wohl relativ problemlos bilden. Dafür spricht, dass inzwischen mehr als hundert von ihnen außerhalb des Sonnensystems entdeckt wurden. Außerdem muss Jupiter schon früh entstanden sein und mit seiner Gegenwart die weitere Akkretion im Asteroidengürtel gestört haben. Bisher war aber unklar, ob sich auch terrestrische Planeten so schnell bilden können. Nun steht fest, dass zumindest ihre Bausteine früh genug vorhanden waren. Das aber heißt, dass auch um andere Sterne wahrscheinlich viele erdähnliche Planeten kreisen, die nur noch auf ihre Entdeckung warten.

Mario Trieloff ist Privatdozent am Mineralogischen Institut der Universität Heidelberg.

CYANOBAKTERIEN

Minimalisten der Meere

Die Sauerstoffproduzenten in den Ozeanen geizen mit ihrem Erbgut. Viele ihrer Gene stammen von anderen Bakterien und sind versehentliche Mitbringsel promiskuitiver Viren.

Von Michael Groß

Mehr als ein Drittel des Sauerstoffs, der auf der Erde tagtäglich durch Photosynthese neu gebildet wird, stammt nicht von Pflanzen, sondern von Mikroben: den früher als Blaualgen falsch einsortierten Cyanobakterien. Diese Einzeller sind klein, aber clever. Sie beherrschen die Kunst, aus Wasser, Kohlendioxid und Sonnenlicht organische Materie zu erzeugen, verwandeln reaktionsträgen Luftstickstoff in nutzbaren Ammoniak, besitzen eine innere Uhr und machen mit minimalem Aufwand das Beste aus den jeweils herrschenden Umweltbedingungen. Ihr Haupttummelplatz sind die Ozeane, wo sie einen Großteil der Biomasse stellen; aber sie kommen auch im Süßwasser und in Gestalt von Flechten sogar in der Antarktis vor.

Umso erstaunlicher ist es, dass eine der beiden häufigsten Gattungen der Cyanobakterien, *Prochlorococcus*, erst vor 15 Jahren beschrieben wurde. Sallie Chisholm, damals Erstautorin des Berichts über die Entdeckung des neuen Genus, ist der Erforschung dieser Mikroben treu geblieben und hat mit ihrer Arbeitsgruppe am Massachusetts Institute of Technology (MIT) in Cambridge nun auch das komplette Erbgut zweier Mitglieder entziffert, die an verschiedene Lichtbedingungen angepasst sind. Außerdem sind kürzlich die vollständigen Genomsequenzen einer weiteren *Prochlorococcus*-Art sowie einer verwandten, ebenfalls im Meerwasser ansässigen *Synechococcus*-Spezies erschienen *(Nature, Bd. 424, S. 1037, 1042 und 1047; Proceedings of the National Academy of Sciences USA, Bd. 100, S. 10020)*.

Die vier Sequenzierungen und der Vergleich ihrer Ergebnisse erbrachten eine ganze Reihe von Überraschungen. Schon die geringe Größe der Genome verblüfft. Gemessen an den vielerlei Aufgaben, die ein Organismus bewältigen muss, wenn er sich lediglich von Licht, Luft und Meerwasser samt darin gelösten Mineralien ernährt, kommen alle vier Arten mit erstaunlich wenig Erbsubstanz und einer extrem geringen Anzahl von Genen aus. Beim Rekordminimalisten *Prochlorococcus* MED4, der mit einem

Durchmesser von weniger als einem Mikrometer auch äußerlich recht klein ausfällt, enthalten dürftige 1,66 Millionen Basenpaare den Bauplan für gerade einmal 1716 Proteine. Chisholm und ihre Mitarbeiter sehen darin die absolute Untergrenze für einen von organischen Nährstoffen unabhängigen Organismus.

Ist diese Minimalausstattung der Mikroben nun ein Erbe ihrer primitiven Vorfahren oder das Resultat einer neuzeitlichen DNA-Diät? Der Vergleich der jetzt vorgelegten Genomsequenzen liefert den Beweis, dass Letzteres zutrifft: Die Cyanobakterien haben offenbar gezielte Schrumpfkuren gemacht und dabei unnütze Gene und die in unserem eigenen Genom so häufigen Mehrfachkopien und Pseudogene über Bord geworfen.

Radikale Schrumpfkur

Vergleicht man etwa das Erbgut der nahe verwandten – nach der Sequenz der ribosomalen RNA sogar ununterscheidbaren – *Prochlorococcus*-Isolate MED4 und MIT9313, so besitzt ersteres 364 Gene, die kein Gegenstück bei letzterem haben. Umgekehrt enthält das um 559 Gene reichere Erbgut von MIT9313 sogar 923 Gene, die MED4 fremd sind. Von diesen 923 findet wiederum nur die Hälfte eine Entsprechung in dem etwas entfernteren Vetter *Synechococcus* WH8102.

Solch spektakuläre Abweichungen im Umfang wie auch in der Zusammensetzung der genetischen Ausstattung zwischen nahen Verwandten lassen sich schwerlich dadurch erklären, dass jede Art die nur bei ihr vorkommenden Gene auf eigene Faust neu entwickelt hat. Viel näher liegt die Vermutung, dass das üppigere Erbgut eines gemeinsamen Vorfahren in unterschiedlichem Ausmaß und nach unterschiedlichen Gesichtspunkten kräftig abgespeckt wurde.

Wie mag es zu dieser radikalen Schrumpfkur gekommen sein? Besser bekannt und untersucht ist das umgekehrte Phänomen: die Anreicherung von scheinbar nutzlosen Vielfachkopien, wenn sich Gene durch Fehler bei der Vererbung verdoppeln. Nach gängiger Ansicht ist sie indirekt von Vorteil, weil genetische Vielfalt einen Schutz gegen Veränderungen der Umweltbedingungen bietet. Trägt eine Art mehrere Kopien eines Gens, so können diejenigen, die nicht benutzt werden, unbeschwert mutieren und womöglich eine Variante hervorbringen, die mit der nächsten drastischen Veränderung der Lebensbedingungen besser fertig wird als die Originalversion. Oder sie wandelt sich mit der Zeit so stark, dass irgendwann ein Gen mit völlig neuartiger zweckmäßiger Funktion herauskommt.

Dieser Mechanismus spielte bei der Fortentwicklung von einfachen zu komplexen Lebewesen eine wichtige Rolle. Und im Y-Chromosom des Mannes dient – wie Sequenzuntersuchungen vor kurzem gezeigt haben – die Ansammlung vielfacher Wiederholungen und Spiegelungen als Sicherheitskopie, die das sonst übliche zweite Exemplar im fehlenden Schwesterchromosom ersetzt.

All diese Gründe für große Mengen redundanter DNA scheinen für die Cyanobakterien der Ozeane nicht zuzutreffen. Tatsächlich bietet das Biotop, in dem marines Plankton gedeiht, weitgehend stabile Lebensbedingungen – im Gegensatz zum Süßwasser, in dem sich die Verwandten mit den größeren Genomen durchschlagen müssen. Zum Ausgleich dafür ist der Lebensraum im Meer allerdings nicht besonders nährstoffreich.

DNA benötigt aber erhebliche Mengen an Phosphor und Stickstoff. Offenbar stellt die Schrumpfung des Genoms eine erfolgreiche Anpassungsstrategie an die kargen, aber stabilen Umweltbedingungen im Ozean dar. Zugleich sorgt die geringe Größe der Zellen für eine effiziente Nährstoffaufnahme durch ein günstiges Verhältnis von Oberfläche zu Volumen. Die Unterschiede zwischen den untersuchten Arten erklären sich somit als spezifische Anpassungen an die in der jeweils besiedelten Wassertiefe verfügbaren Mengen an Licht und Mineralien.

Viren als Genspender

Aber selbst das stabilste Biotop wandelt sich mit der Zeit. Wie können sich die Cyanobakterien an die veränderten Bedingungen anpassen, wenn sie ganz auf Genverdopplungen als Möglichkeit zur Entwicklung neuer Erbanlagen verzichten? Die Arbeiten aus Chisholms Labor zeigen, dass der so genannte horizontale Gentransfer, also die Übertragung von Genen zwischen gleichzeitig nebeneinander existierenden Arten (im Gegensatz zur »vertikalen« Vererbung im Laufe der normalen Fortpflanzung) den Mangel ausgleichen könnte. Berüchtigt ist diese Art des Austauschs von Erbmaterial vor allem, weil sie für die globale Ausbreitung von Antibiotikaresistenzen sorgt. Dabei tragen Krankheitserreger die Resistenzgene oft auf einem vom eigentlichen Genom getrennten DNA-Ring, einem so genannten Plasmid. Dieses lässt sich beim Zusammentreffen von Mikroben relativ leicht übertragen.



INSTITUTO DE BIOQUÍMICA VEGETAL Y FOTOSÍNTESIS, SEVILLA

JASON K. OYADOMARI

Synechococcus **zählt zu den im Meer lebenden Cyanobakterien, deren Erbgut jetzt entziffert wurde. Gemessen an den Fähigkeiten der winzigen Mikroben, die Photosynthese treiben und Luftstickstoff fixieren können, ist das Genom erstaunlich klein.**

Bei den Cyanobakterien hingegen dienen offenbar Viren – so genannte Cyanophagen – als wichtigste Genfähren. Ihre verräterischen Spuren kamen bei der Erbgutanalyse zu Tage. Dutzende von Genen der Cyanobakterien sind von Begleitsequenzen flankiert, welche die Handschrift eines Cyanophagen tragen. Offenbar kommt es gar nicht selten vor, dass ein solcher Eindringling – sofern er von jener gemäßigten Sorte ist, die ihre Opfer in der Regel am Leben lässt und sich nur in deren Erbgut einnistet – bei einer Wirtszelle versehentlich ein Gen aufschnappt und es dann der nächsten zum Geschenk macht.

Diese Art von Transfer bleibt folgenlos, solange sich die Viren an eine Spezies halten. Chisholms Arbeitsgruppe identifizierte allerdings eine Gruppe von Cyanophagen, die verschiedene Arten infizieren kann und in freier Wildbahn sowohl in *Prochlorococcus* als auch in *Synechococcus* auftritt. Damit müssen diese Viren wohl als Mitschuldige am Zustandekommen der teilweise spektakulären Unterschiede zwischen den nahe verwandten ▷

▷ Cyanobakterien gelten: Im Grunde üble Schmarotzer, verhelfen sie ihren Opfern doch manchmal unfreiwillig zu einem Überlebensvorteil.

Demnach geht es im wichtigen Ökosystem des marinen Planktons, das uns mit einem Großteil unseres Sauerstoffs versorgt, mit den Regeln der Biologie ziemlich drunter und drüber. Wenn horizontaler Genaustausch fast so wichtig ist wie traditionelle Vererbung, verliert der auf vererbten Eigenschaften fußende Artenbegriff seinen Sinn. Die Autoren der Genomstudien vermeiden es deshalb, von Spezies zu reden, und verwenden lediglich Nummern für das jeweils untersuchte Bakterien-Isolat. Einmal mehr wird so deutlich, wie wenig wir im Grunde über das Leben im größten Teil der Biosphäre, den Ozeanen, wissen.

Michael Groß hat in Biochemie promoviert. Heute ist er freier Wissenschaftsjournalist und »Science Writer in Residence« am Birkbeck College in London.

PHARMAFORSCHUNG

Konkurrenz für Nitroglyzerin

Beim Durchmustern hunderttausender chemischer Verbindungen nach Ersatzstoffen für Nitroglyzerin fanden Forscher kürzlich zwei viel versprechende Substanzklassen. Sie gleichen im Wirkungsprofil dem 120 Jahre alten Herzmittel, haben aber nicht dessen Nachteile.

Von Peter Schmidt

Herz-Kreislauf-Erkrankungen gehören nach wie vor zu den häufigsten Todesursachen in den westlichen Industriestaaten. Die Entwicklung von Medikamenten zu ihrer Behandlung hat eine lange Historie. Doch kaum ein pharmakologischer Wirkstoff blickt auf eine so bewegte Geschichte zurück wie Nitroglyzerin, das auch heute noch zu den am meisten verabreichten Arzneimitteln gehört. Nach der Erstsynthese der Verbindung im Jahre 1847 stand ihre Explosivkraft im Vordergrund, auf die Alfred Nobel Jahre später seine Dynamitproduktion in Stockholm gründete.

Daneben aber zeigten sich bald auch unerwünschte physiologische Wirkungen an Personen, die mit dem brisanten Stoff in Kontakt kamen. Dazu gehörten vor allem starke Kopfschmerzen. Außerdem klagten die Arbeiter in den Dynamitfabriken am Beginn der Arbeitswoche über Schwindelgefühle und Ohnmachtsanfälle – Symptome eines niedrigen Blutdrucks. Am Wochenende litten sie dagegen unter Entzugserscheinungen, die sich insbesondere in starken Brustschmerzen äußerten. Um ihnen vorzubeugen, ging man dazu über, an arbeitsfreien Tagen die Kleidung mit Nitroglyzerin zu benetzen.

Von diesen Beobachtungen war es nur noch ein kleiner Schritt bis zur ersten Anwendung des explosiven Stoffs bei Patienten mit Angina Pectoris. William Murrell berichtete 1879 in »The Lancet« erstmals darüber. Es ist eine Ironie des Schicksals, dass auch Alfred Nobel kurz vor seinem Tod den Wirkstoff unter dem Namen »Trinitrin« gegen seine Herzprobleme verschrieben bekam, sich jedoch weigerte ihn einzunehmen.

Seither sind zum Nitroglyzerin weitere organische Nitrate als Mittel zur Behandlung einer mangelhaften Durchblutung der Herzkranzgefäße hinzugekommen. Auch der Wirkungsmechanismus konnte immer genauer entschlüsselt werden. All diese Medikamente sind nicht als solche pharmakologisch wirksam. Vielmehr durchlaufen sie im Körper eine Biokonversion, bei der – über einen Reaktionsweg, der erst im vergangenen Jahr aufgeklärt wurde – letztendlich das als Schadstoff aus Abgasen bekannte Stickstoffmonoxid (NO) entsteht. Dieses diffundiert in die glatte Muskulatur der Blutgefäße und aktiviert dort das Enzym »lösliche Guanylatcyclase«, das daraufhin die Synthese des intrazellulären Botenstoffs cyclisches Guanosinmonophosphat (cGMP) katalysiert. Über diverse Zwischenschritte kommt es so schließlich durch eine Erschlaffung der Muskulatur zu einer Erweiterung der Blutgefäße einschließlich der Koronararterien, sodass das Herz besser durchblutet wird.

Altbewährt, aber unvollkommen

Für die Entdeckung, dass die Blutgefäßwände selbst NO bilden, und für bahnbrechende Arbeiten über die Wirkung von NO im Herz-Kreislauf-System erhielten Ferid Murad, Louis Ignarro und Robert Furchgott 1998 – mehr als ein Jahrhundert nach dem Tod Alfred Nobels – den von ihm gestifteten Preis für Medizin oder Physiologie (Spektrum der Wissenschaft, 12/1998, S. 22). Die Ergebnisse ihrer Arbeiten über den NO-cGMP-Signalweg stimulierten unter anderem die Entwicklung von Medikamenten wie Viagra und Levitra, die ebenfalls über eine Erhöhung des Botenstoffs cGMP Erektionsstörungen beheben.

So nützlich die organischen Nitrate bei Herz-Kreislauf-Erkrankungen sind, zeigen sie allerdings eine Reihe störender Nebenwirkungen. So klagen bis zu fünfzig Prozent der Patienten zumindest am Anfang der Therapie über starken Kopfschmerz. Zudem baut sich nach mehrfacher Gabe schnell eine Nitrattoleranz auf,

Aktivator

Stimulator

NO

BAYER HEALTH CARE

◀ **Die neuen Substanzen aktivieren wie Stickstoffmonoxid (NO) die Guanylatcyclase, sodass diese Guanosintriphosphat (GTP) in cyclisches Guanosinmonophosphat (cGMP) umwandelt. Sie docken jedoch an anderen Stellen an. NO heftet sich an das zentrale Eisen-Atom (Fe) einer Hämgruppe (blau), die deshalb an das Enzym gebunden sein muss. Der Aktivator braucht dagegen keine Hämgruppe, während der Stimulator synergistisch mit NO zusammenwirkt.**

der sich nur durch vorübergehendes Absetzen des Medikaments begegnen lässt.

Ein Nachteil von Nitroglyzerin ist auch, dass es, um zu wirken, erst in NO umgewandelt werden muss. Dieser Umstand verhindert eine Hemmung der Aggregation von Blutplättchen als zusätzlichen therapeutischen Effekt, da diese zwar über den NO-Rezeptor lösliche Guanylatcyclase verfügen, aber offensichtlich nicht über die Enzymausstattung zur Biokonversion des Nitroglyzerins.

Erfolg beim Massenscreening

Aus all diesen Gründen bemüht sich die pharmazeutische Industrie seit einigen Jahren, einen Wirkstoff zu finden, der die Guanylatcyclase unabhängig von NO aktiviert. So hofft man, die Vorteile der organischen Nitrate unter Vermeidung ihrer Nebenwirkungen nutzen zu können. Zu diesem Zweck wurden hunderttausende potenzielle Verbindungen durch automatisierte Roboter-Screening-Systeme getestet. Normalerweise ist es sehr viel unwahrscheinlicher, einen Enzymaktivator als einen Inhibitor zu finden. In diesem Fall lieferte die Suche aber sogar gleich zwei Klassen von Aktivatoren des NO-Rezeptors – ein echter Glücksfall.

Beide Substanzklassen führten in Versuchstieren ebenso wie Nitroglyzerin zu einer Gefäßerweiterung. Abgesehen davon offenbarten sie aber völlig unterschiedliche Wirkungsprofile. Daher möchte ich sie im Folgenden zur Unterscheidung als Aktivatoren und Stimulatoren bezeichnen. Letztere haben die ebenso überraschende wie faszinierende Eigenschaft, in Kombination mit NO eine überadditive Wirkung zu zeigen. Dieser Synergismus macht sie dem Nitroglyzerin überlegen: Statt nur weiteres NO zu liefern, potenzieren sie die Wirkung des natürlich vorhandenen Botenstoffs. Auf diese Weise vermeiden sie, wie die Untersuchungen an Tieren und erste Studien am Menschen bestätigten, die geschilderten Nebenwirkungen.

Die zweite Substanzklasse zeigt zwar keine Synergie, ist aber in einer anderen Hinsicht sowohl dem NO als auch den Stimulatoren überlegen: Im Gegensatz zu beiden hängt ihre Wirkung auf die Guanylatcyclase nicht davon ab, ob gleichzeitig eine Hämgruppe an das Enzym gebunden ist und das Eisen darin im reduzierten zweiwertigen Zustand vorliegt. Damit wirkt die neue Aktivatorklasse auch dann, wenn das körpereigene NO ▷

KOMMENTAR

Physik fürs Volk!?

Schlagen Sie Seite 157 auf und arbeiten Sie die folgenden zehn Seiten durch!«, befiehlt die monotone Stimme des betagten Physiklehrers. Die drei blonden Teenager in der ersten Reihe lassen sich dadurch nicht stören – statt sich mit Quantenphysik zu befassen, schwärmen sie kichernd von ihrem Helden Aragorn aus dem Film »Herr der Ringe«. Staubtrockener Unterricht auf der einen Seite, desinteressierte Schüler auf der anderen: Die parodistische Szene, mit der schwedische High-School-Absolventinnen auf dem »Physics on Stage«-Festival in Nordwijk letzten November ihre furiose Aufführung von »Alice im Quantenland« (einer Drama-Adaption des gleichlautenden Buchs von Robert Gilmore) beginnen, entspricht leider vielerorts der traurigen Wirklichkeit.

Eben diesen Missstand zu beheben ist Ziel der »Physics on Stage«-Initiative, die 1999 von den drei Großforschungseinrichtungen Cern, Eso und Esa ins Leben gerufen wurde und mittlerweile von weiteren europäischen Laboratorien unterstützt wird – nicht ganz uneigennützig, denn immer weniger junge Leute entschließen sich zu einem naturwissenschaftlichen Studium.

Hätten sie die Möglichkeit, sich in der jahrmarktsähnlichen Atmosphäre der Festivals zu tummeln, würden sie sich vielleicht eines anderen besinnen. Hier macht Physik wirklich Spaß, ob nun polnische Lehrerinnen anhand zerkleinerter Gurken vorführen, wie Osmose funktioniert, oder ob ein belgischer Lehrer den ultimativen Test bereithält, echte Männer von echten Frauen zu unterscheiden (bei letzteren liegt der Schwerpunkt etwas tiefer).

Wer an den Festivals teilnimmt, ist begeistert. Doch in dem »Wer« steckt leider auch der Haken. Denn bei einem Kontingent von etwa zwanzig Personen pro Land zählt gerade mal ein Promille der deutschen Physiklehrer zum Kreis der Auserwählten.

Das Problem, nur einen Bruchteil der Adressaten zu erreichen, teilt sich »Physics on Stage« mit anderen Aktionen zur Popularisierung der Naturwissenschaften. So profitieren auch von der zunehmenden Kooperation von Forschungsinstitutionen mit Schulen nur die Jugendlichen, die in der Nähe der Veranstaltungsorte wohnen. Ähnliches gilt für die von der Bundesvereinigung der Deutschen Arbeitgeberverbände zu »mathematisch naturwissenschaftlichen Excellence-Centern« gekürten Schulen, die nicht gerade flächendeckend verteilt sind und daher nur einem kleinen Teil der begabten Schüler zu Gute kommen.

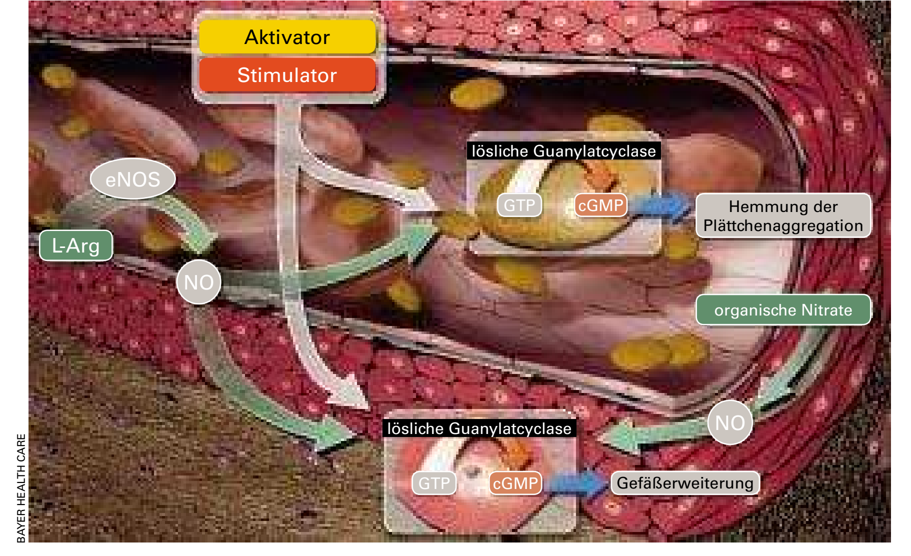
Die deutschen Organisatoren von »Physics on Stage« haben dennoch den Ehrgeiz, Breitenwirkung zu entfalten. So wollen sie die Konzepte der auf den Festivals vorgestellten Experimente als Unterrichtsmaterialien zur Verfügung stellen und Vorschläge zur Umgestaltung der Lehrpläne erarbeiten.

Doch zwischen den entwickelten Vorstellungen und der rauen Schulwirklichkeit liegen Welten. So wird stets betont, wie wichtig Lehrerfortbildung sei – die Mittel hierfür wurden indes in den letzten Jahren immer mehr gekürzt. Die hohen Ansprüche an den Physikunterricht bedeuten einen größeren Zeitaufwand für den einzelnen Lehrer; dessen Pflichtstundenzahl wird aber permanent erhöht.

Der Gestaltung des Physikunterrichtes hat die »Physics on Stage«-Initiative auf jeden Fall wichtige Impulse gegeben. Doch die Umsetzung der Ideen droht an den personellen und finanziellen Engpässen der Schulen zu scheitern. Ein qualitativ besserer Unterricht wird sich flächendeckend nur verwirklichen lassen, wenn dieser Bildungssektor einen höheren gesellschaftlichen Stellenwert und damit auch mehr Geld erhält. Bleibt dieser »Ruck« aus, dann wird auch die »Physics on Stage«-Initiative auf die Dauer ins Leere laufen.

Olivia Meyer

Die Autorin ist promovierte Physikerin und freie Wissenschaftsjournalistin in Ratingen.



Der neue Aktivator und Stimulator wirken ähnlich wie körpereigenes NO, das von der endothelialen NO-Synthase (eNOS) aus der Aminosäure Arginin (Arg) erzeugt wird. Durch Aktivierung der Guanylatcyclase können sie sowohl die Blutgefäße erweitern als auch die Aggretation von Blutplättchen hemmen. Organische Nitrate wie Nitroglyzerin haben die letztgenannte Fähigkeit dagegen nicht – vermutlich weil sie in Blutplättchen nicht in NO umgewandelt werden.

in ausreichender Menge gebildet wird, der NO-Rezeptor aber wegen einer oxidativen Veränderung der Hämgruppe nicht auf den Botenstoff anspricht. Zwar lässt sich dieser Zustand mit dreiwertigem Eisen im Gewebe derzeit noch nicht exakt bestimmen; dennoch dürfte er bei Herz-Kreislauf-Patienten nicht selten vorliegen, weil Krankheiten wie die koronare Herzerkrankung, Arteriosklerose und Herzinsuffizienz in der Regel mit oxidativem Stress einhergehen. In diesem Fall sollte die neu entdeckte Aktivatorklasse das Mittel der Wahl sein.

Wie die bisherigen Untersuchungen belegen, taugen die beiden neuen Substanzklassen also nicht nur als gleichwertiger Ersatz für die organischen Nitrate, sondern haben auch viel weniger Nebenwirkungen und Nachteile. Derzeit werden sie in klinischen Phase-I-Studien getestet. Dabei zeigen sie dasselbe Wirkungsprofil wie zuvor in den Untersuchungen an Tieren. Bis zur Einsatzreife werden noch einige Jahre vergehen. Aber schon jetzt zeichnet sich ab, dass die neuen Substanzen das Potenzial besitzen, die Behandlung von Herz-Kreislauf-Erkrankungen einen großen Schritt voranzubringen. Ein fester Platz in der Bekämpfung dieser Volksseuche dürfte ihnen damit so gut wie sicher sein.

Peter Schmidt ist Diplombiologe und hat seine Doktorarbeit in der Herz-Kreislauf-Pharmakologie der Bayer Health Care AG in Wuppertal angefertigt.

NACHGEHAKT

Nukleare Schlamperei

Wieder einmal sind Experten der Internationalen Atomenergiebehörde IAEO in einem Gebiet der ehemaligen Sowjetunion unterwegs, um vagabundierende hochradioaktive Substanzen sicherzustellen: In Transnistrien, einer abgespaltenen Region Moldawiens, geriet strahlendes Material in private Hände, und im hohen Norden bei Murmansk stahlen Unbekannte mehrere Kanister mit Strontium-90 aus Radioisotopen-Wärmegeneratoren, mit denen militärische Funkfeuer an der arktischen Küste betrieben werden *(Science, 5.12.2003, S. 1644)*. Schon vor einem Jahr musste sich ein IAEO-Team in Georgien auf die Suche nach solchen heißen Zellen machen (SdW 4/2002, S. 98).

Jeder der rund tausend kompakten radioaktiven Generatoren für Navigationshilfen und Wetterstationen, die seit den 1970er Jahren über die Sowjetunion verteilt wurden, enthält mindestens so viel Strontium-90, wie 1986 bei der Tschernobyl-Katastrophe frei wurde. Die Nachfolgestaaten der UdSSR sind oft weder wirtschaftlich noch politisch firm genug, um die sichere Verwahrung des brisanten Materials garantieren zu können. Neben der Selbstgefährdung Einzelner durch unsachgemäßes Hantieren mit strahlenden Kanistern droht gezielter Missbrauch zu terroristischen Zwecken. Radioaktive Substanzen, mit einem konventionellen Sprengsatz in die Umwelt verteilt, könnten als schmutzige Bomben eine schreckliche und lang anhaltende Wirkung entfalten (SdW 3/2003, S. 28).

Aber nicht nur die frühere Sowjetunion ist eine Quelle diffusen radioaktiven Risikos. In aller Welt wird strahlendes Material eingesetzt – in der physikalischen Forschung, in der Industrie, in Krankenhäusern, zum Konservieren von Lebensmitteln und natürlich vor allem für militärische Zwecke. Auch davon taucht ein Teil nie wieder auf. Allein in den USA haben sich im Laufe der Jahre 2,5 Tonnen Plutonium in Luft aufgelöst. Zum Beispiel sind aus amerikanischen Forschungseinrichtungen und Firmen Hunderte radioaktiver Objekte abhanden gekommen. Ein Bericht des Los Alamos National Laboratory vom September 2003 listet 134 in den USA hergestellte Radioisotopen-Wärmegeneratoren auf, von denen aber nur noch 47 auffindbar sind.

Offensichtlich reichen nationale Anstrengungen zur Kontrolle all der radioaktiven Substanzen nicht aus. Darum richten sich die Hoffnungen auf international abgestimmte Initiativen, die bisher meist von den USA ausgingen und sich auf die Probleme der ehemaligen UdSSR konzentrierten.

Mit der Aufnahme früherer Ostblockstaaten in die Europäische Union wird das Problem, die Nichtverbreitung nuklearen Materials aus osteuropäischen Forschungsreaktoren zu garantieren, ja auch zu einem gesamteuropäischen Anliegen *(Nature, 20.11.2003, S. 213)*. Im Gegenzug sollten die beiden größten Kernwaffenstaaten USA und Russland endlich ihre aus der Ära des Kalten Kriegs gewohnte Heimlichtuerei beenden und sich einer internationalen Kontrolle ihrer nuklearen Bestände öffnen – wie sie dies von kleineren Ländern wie Nordkorea und Iran zu Recht verlangen. Anders wird das Risiko nuklearen Missbrauchs in einer politisch immer unübersichtlicheren Welt nicht zu bändigen sein.

Michael Springer

Brennende Regenwälder

Torfwaldbrände in Indonesien setzen ungeheure Mengen des Treibhausgases Kohlendioxid frei. Eingriffe des Menschen sind schuld, dass diese Wälder neuerdings brennen.

Von Florian Siegert

Vor einigen Jahren druckten die Zeitungen Fotos von den Straßen Singapurs und Jakartas, wo die Menschen mit Atemmasken herumliefen. Dichter Qualm hüllte damals Indonesien und Malaysia monatelang ein. Die Rauchwolke reichte bis nach Thailand, Nordaustralien und Papua-Neuguinea.

Ursache war die größte jemals in Asien beobachtete Feuerkatastrophe. Auf Borneo, Sumatra und Neuguinea brannten die Regenwälder. Nach einer Schätzung der Asien Development Bank gingen in jenen Jahren 1997 und 1998 rund 10 Millionen Hektar, eine Fläche doppelt so groß wie die Schweiz, großenteils in Flammen auf.



FLROIAN SIEGERT

In den ausgetrockneten Torfsumpfwäldern Indonesiens verbrannte der Torf 1997/98 bis zu zwei Meter tief. Die schwelenden Bodenfeuer erzeugten gewaltige Rauchmengen.

Dabei gelangten ungeheure Mengen des Treibhausgases Kohlendioxid in die Atmosphäre. Ein bedeutender Teil der indonesischen Wälder wächst auf mächtigen Torfflözen, in denen große Mengen Kohlenstoff gespeichert sind. Besonders diese Gebiete hatten damals Feuer gefangen. Die Riesenbrände dieser Torfwälder verstärken den globalen Treibhauseffekt messbar.

15 Jahre zuvor, 1982/83, hatten sich schon einmal – wohl erstmals seit Menschengedenken – riesige Feuersbrünste durch die indonesischen Urwälder gefressen. Damals suchten sie den indonesischen Teil Borneos (Kalimantan) heim, die drittgrößte Insel der Erde. In der indonesischen Provinz Ost-Kalimantan brannte eine Fläche von über 3 Millionen Hektar. Die Hälfte davon war Wald. Wie wir heute wissen, verschuldete letztlich der Mensch beide Katastrophen, die in solcher Größenordnung früher nicht vorkamen. Doch in Zukunft drohen sich ähnlich verheerende Feuer zu wiederholen, womöglich in noch größerem Ausmaß – solange die Verantwortlichen dem nicht entgegensteuern.

Aber 1997/98 schoben Behörden, Wissenschaftler und Medien die Hauptschuld zunächst auf das extreme El-Niño-Jahr. Das Klimaphänomen El Niño entsteht durch großräumige Verschiebungen von warmen und kalten Meeresströmungen im Südpazifik. Dabei treten in manchen sonst niederschlagsarmen Gegenden rund um den Südpazifik massive Regenfälle auf. In anderen bleiben die gewohnten Monsunregen weitgehend aus, so auch in Indonesien.

Das Inselreich erlebte 1997/98 einen besonders ausgeprägten El Niño. Die Trockenzeit, die auf unsere Sommermonate fällt, setzte 1997 zwei Monate früher ein als sonst. Zudem begann die Regenzeit statt Mitte Oktober erst Mitte November. Diesmal war sie außerdem ungewöhnlich schwach und kurz. Schon nach zwei Monaten hörten die Niederschläge auf. Erst im Mai 1998 regnete es wieder stark. Bereits 1997 und dann nochmals in den ersten Monaten des folgenden Jahres wüteten die Waldbrände. Im zweiten Halbjahr 1997 verwüsteten sie Wälder auf Sumatra und Irian Jaya (Westpapua) sowie auf Borneo insbesondere die indonesische Provinz Zentral-Kalimantan. Im ersten Halbjahr 1998 wüteten die Feuer ausschließlich in der Provinz Ost-Kalimantan. Insgesamt brannten die indonesischen Wälder fast zehn Monate lang.

Um die Hintergründe für diese Katastrophen und deren klimatische Folgen zu klären, hat eine Gruppe indonesischer und europäischer Wissenschaftler, zu der ich gehörte, im Auftrag der Deutschen Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ), der Europäischen Raumfahrtagentur (Esa) und für die Europäische

DPA

Bis in die Klassenzimmer drang der Rauch der indonesischen Waldbrände vor, wie hier in einer Schule auf Sumatra. Die Gesundheitsschäden gingen in die Milliarden.

Kommission mehrere Forschungsprojekte durchgeführt. Wir wollten herausfinden, wieso neuerdings in ausgeprägten El-Niño-Jahren indonesische Regenwälder in Flammen aufgehen. Schließlich existiert das Wetterphänomen seit vielen Jahrtausenden. Auch interessierten sich Klimatologen dafür, wie viel Pflanzenmaterial in jenen Monaten verbrannte und welche Mengen des Treibhausgases Kohlendioxid dabei in die Atmosphäre gelangten. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen fanden in englischsprachigen Medien sofort große Resonanz, in deutschsprachigen leider bisher wenig.

Satellitendaten zur Schadensanalyse

Wir haben einerseits die Verhältnisse vor Ort untersucht, andererseits insbesondere Satellitenaufnahmen von verschiedenen europäischen und amerikanischen Satellitensystemen von Phasen vor, während und nach den Bränden von 1997/98 ausgewertet. Hierbei konzentrierten wir uns auf zwei große Brandgebiete in Zentral- und Ost-Kalimantan (siehe Karte Seite 26 unten), weil sich die Waldbrände in diesen beiden Regionen in Ursache und Wirkung deutlich unterschieden.

Erst die Satellitendaten ermöglichten einen Überblick über das Ausmaß der Schäden. Die Provinz Zentral-Kalimantan weist bei einer Fläche der Größe Bayerns nur etwa tausend Kilometer Straßen auf. Und von den Flüssen aus, die das eigentliche Verkehrsnetz bilden, kann man dort in den Urwald fast nicht vordringen. Dicht am Wasser aber hatten die Pflanzen wenig gebrannt. Vom Boot aus erschien der Wald oft völlig intakt, auch wenn er wenige Kilometer weiter innen komplett vernichtet war.

Normalerweise dürfte ein tropischer Regenwald schon wegen der Nässe, die in ihm steckt, nicht brennen. Selbst in Trockenzeiten hält das Blätterdach, das kaum einen Sonnenstrahl durchlässt, alles unter sich feucht. Auch zersetzt sich totes pflanzliches Material in dem stets warmen und feuchten Mikroklima rasch, sodass äußerst wenig leicht entflammbares Holz oder Laub vorhanden sind.

Dass Feuer, anders als etwa in gemäßigten Zonen, nicht Teil der natürlichen Ökologie von Tropenwäldern sind, zeigt sich auch an den fehlenden Anpassungen der Vegetation. Viele Bäume gemäßigter Breiten widerstehen mit ihrer dicken Borke den Flammen. Oft benötigen ihre Samen die Hitze sogar zur Keimung. Tropenbäume haben meist nur eine sehr dünne Rinde. Sie verbrennen in den Flammen. Auch ihre Samen gehen zu Grunde.

Zur ökologischen Bestandsaufnahme verwendeten wir Bilder des amerikanischen Landsat-Satelliten. Er liefert seit mehr als zwanzig Jahren Farbbilder der Erdoberfläche mit dreißig Metern räumlicher Auflösung. Wie diese Bilder erkennen lassen, stellt das gesamte Tiefland Zentral-Kalimantans ursprünglich ein riesiges, bewaldetes Torfmoor dar, einen Torfsumpfwald, also ein besonders nasses Ökosystem. An der Küste säumen diesen Regenwald Mangroven – an Salz- oder Brackwasser angepasste Wälder – und erst etwa 150 Kilometer tiefer im Innern, wo das Land anzusteigen beginnt, geht er in einen typischen Tieflandregenwald über.

Natürlicherweise ist der Boden dieser tropischen Torfwälder alljährlich ein paar Monate überschwemmt. Die Dajaks, die von den europäischen Kolonisatoren und ▷

Forschungsreisenden als Kopfjäger gefürchtete Urbevölkerung, besiedelten diesen Wald nicht, weil der Boden zu feucht und unfruchtbar ist. Auch die holländischen Kolonialherren konnten nur kleine Areale durch ein ausgeklügeltes Be- und Entwässerungssystem landwirtschaftlich nutzbar machen. Noch bis vor zwanzig Jahren zeigte sich dieses nasse, moorige Tiefland auf Satellitenbildern zum allergrößten Teil als völlig ungestörter Urwald. Höchstens entlang der Küste und der größeren Flüsse zeichneten sich vereinzelte Dörfer ab.

Folgen des Raubbaus

Wie neuere Landsat-Aufnahmen zeigen, hat der Mensch die Torfwaldgebiete stark dezimiert. Die Auswertung einer Bildserie von 1991 bis 1997 ergab, dass in diesem Zeitraum in Zentral-Kalimantan pro Jahr durchschnittlich 2,3 Prozent des Torfsumpfwalds vernichtet wurden. Seither stieg der Raubbau sogar auf drei Prozent pro Jahr.

Solche zerstörten, ungenutzten Flächen verbuschen oder – schlimmer noch – veröden, falls sie wieder verbrennen, zu einem artenarmen Gras-Farn-Ökosystem, in dem Wald von allein nicht wieder hochkommen kann. Der Anteil karger Gras- und Buschvegetation war in den wenigen Jahren um 437 Prozent gestiegen, während die landwirtschaftlich genutzte Fläche im gleichen Zeitraum nur um sieben Prozent (21 000 Hektar) zunahm. Ein großer Teil der verbliebenen Sumpfwaldfläche war durch Holzeinschlag gestört: Konzessionäre öffneten siebzig Prozent der Waldfläche, indem sie Schneisen schlugen, einzelne Bäume herausholten und dadurch Lichtungen schufen. So verlor der Wald in regenarmen Monaten viel Feuchtigkeit, weil die Sonne den Boden und nachwachsende Jungpflanzen ausdörrte.

Noch gravierender wirkte sich Mitte der 1990er Jahre ein politisches Prestigeprojekt des langjährigen, inzwischen abgetretenen indonesischen Präsidenten Ibrahim Suharto aus. Der Diktator entschied damals, eine Million Hektar Urwald für Reisfelder roden zu lassen, und wählte dafür ausgerechnet die für den Zweck völlig ungeeigneten Torfsumpfwälder Zentral-Kalimantans aus. Binnen eines Jahres ließ er kreuz und quer durch das Gebiet über 4400 Kilometer Entwässerungskanäle graben. Nur wurden die geplanten Schleusen nie fertig gestellt. Dadurch sank der Wasserspiegel in den Torfwäldern während der El-Niño-Trockenheit innerhalb weniger Monate um ein bis zwei Meter. In der Folge starben wegen Wassermangel und Übersäuerung viele Bäume ab.

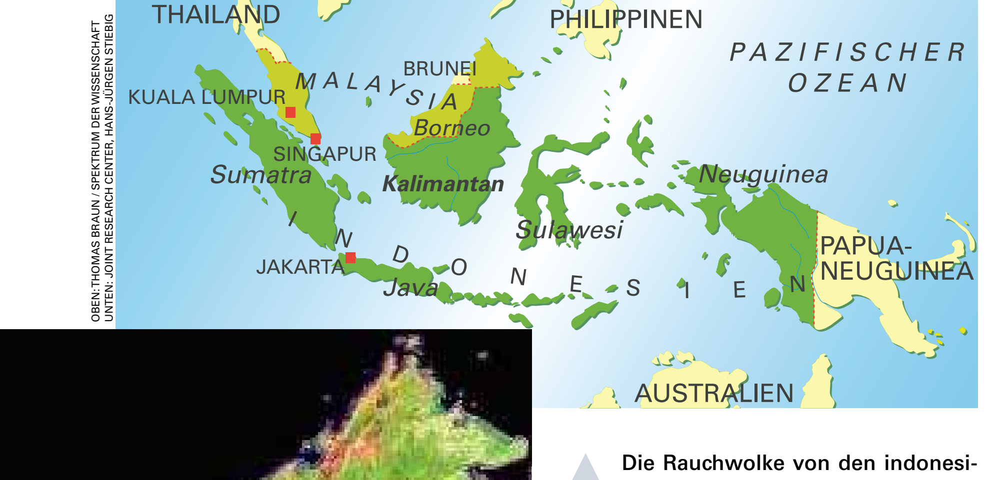
Als dann auf Grund des El Niño der Regen ausblieb, war die Katastrophe vorprogrammiert. Vorzeichen für ein schweres El-Niño-Jahr nahmen die Behörden nicht ernst und gaben keine Warnungen heraus. Traditionell nutzen die indonesischen Bauern die Trockenzeiten, um mittels Brandrodung neue Ackerflächen zu gewinnen. Die Brände, die zur Rodung für das Reisprojekt gelegt wurden, gerieten außer Kontrolle und breiteten sich schnell in den trockengelegten Torfgebieten aus. Hinzu kam, dass skrupellose Unternehmer die extreme Trockenheit als besonders gute Gelegenheit wahrnahmen, um mittels Feuer schnell und kostengünstig Land für neue Plantagen zu roden.

Von der Tradition zur unverantwortlichen Brandrodung

Die Feuer erreichten gewaltige Ausmaße und drangen auch in intakte Torfwälder ein. Sie zerstörten nicht nur die üppige Waldvegetation, sie fraßen sich auch durch die Torfflöze und setzten dadurch riesige Mengen Rauch frei, der schließlich fast ganz Südostasien bedeckte und den Menschen in entfernten Großstädten wie Singapur und Kuala Lumpur gesundheitlich schwer zu schaffen machte.

Uns interessierte besonders, wie viel Kohlendioxid (CO_2) durch diese gewaltigen Torfbrände freigesetzt wurde und inwieweit diese Katastrophe zur Erderwärmung beiträgt. Torf ist ja die Vorstufe zu Kohle, also fossile Biomasse, deren Kohlenstoffanteil durch Verbrennung in Form von CO_2 und anderen Gasen in die Atmosphäre gelangt.

Auch hier lieferte die Satellitenfernerkundung die notwendigen Daten. Wichtigste Größen waren die Brandfläche sowie das verbrannte Material. Denn zur Berechnung des CO_2-Ausstoßes macht es einen Unterschied um den Faktor zehn bis tausend, ob Gras, Wald oder Torf verbrannt sind. Zur exakten Ermittlung der Brandfläche mussten wir Daten von drei verschiedenen Satellitensystemen auswerten. Wir nutzten einerseits Landsat-Daten. Da der Landsat-Satellit das gleiche Gebiet der Erdoberfläche nur alle 16 Tage aufnimmt, erhielten wir erst ein halbes Jahr nach den Bränden eine brauchbare Aufnahme (Bild Seite 29 unten). Zuerst versperrte dichter Rauch die Sicht, dann dicke Regenwolken, und da-



OBEN: THOMAS BRAUN / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT
UNTEN: JOINT RESEARCH CENTER, HANS-JÜRGEN STIEBIG

Die Rauchwolke von den indonesischen Waldbränden 1997/98 reichte weit über Indonesien hinaus. Sie erstreckte sich über mehr als 2000 mal 4000 Kilometer. Der Qualm quälte die Menschen monatelang. Das wolkenfreie Mosaik links von der Insel Borneo entstand aus SPOT-VEGETATION-Satellitendaten aus dem Jahr 1998. Die Brandflächen erscheinen rot. Eingezeichnet sind die Untersuchungsgebiete in Zentral- und Ost-Kalimantan.

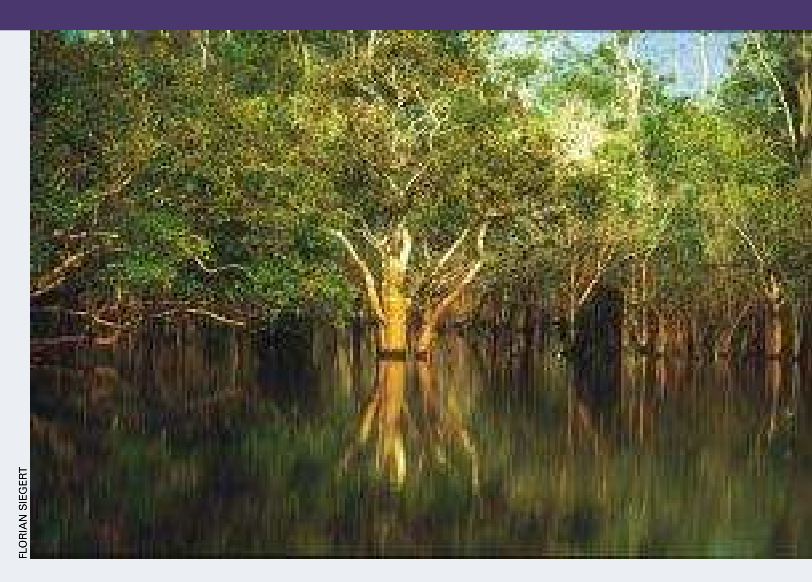
Regenwald auf Torfmoor

Einzigartiges Ökosystem

In Indonesien finden sich die größten Torfwaldgebiete weltweit. Sie bedecken etwa zehn Prozent der Landesfläche (rund 20 Millionen Hektar). Auf Torf wachsende Wälder sind als Ökosystem kaum bekannt und wissenschaftlich wenig erforscht. Erstaunlich ist, dass auf diesen viele Meter dicken Torflagern Wälder wachsen, deren Bäume bis fünfzig Meter hoch werden können. Torf ist ein extrem nährstoffarmes, fast lebensfeindliches Bodensubstrat. Nur spezialisierte Pflanzen können dort überleben und gedeihen. Daher ist die Vegetation im Torfsumpfwald einzigartig.

Die Artenvielfalt ist mit bis zu 120 Baumarten pro Hektar nicht so hoch wie im Tieflandregenwald, jedoch wesentlich höher als in den Wäldern der gemäßigten Breiten. Typisch ist eine Vielfalt Fleisch fressender Kannenpflanzen, die hier wegen der Nährstoffarmut ideale Bedingungen finden. In den letzten Jahren wurden in Borneo die Torfwälder Zentral-Kalimantans letztes Rückzugsgebiet für den Orang-Utan.

Viele der Kenntnisse über diesen Waldtyp hat erst Jack Rieley von der Universität Nottingham (England) in den letzten acht Jahren gewonnen, der in unserem Team mitarbeitet. Er bestimmte zusammen mit Kollegen durch Bohrungen Dicke und Alter der Torfflöze in Südborneo. Sie reichen mancherorts bis zu 18 Meter tief. Rieleys Radiokarbonmessungen zeigten, dass sich die Torflager in den letzten 20000 Jahren gebildet haben. Dabei wurden riesige Mengen Kohlendioxid (CO_2) fixiert.



FLORIAN SIEGERT

Torfsumpfwälder sind in der Regenzeit oft überflutet, was die Torfbildung fördert. Auf den nährstoffarmen Böden überleben nur spezialisierte Tier- und Pflanzenarten.

Ursachen für die Torfbildung in der Sundaschelf-Region sind ein extrem geringes Gefälle des Geländes, der ansteigende Meeresspiegel nach der letzten Eiszeit und die großen Wassermassen, welche die Flüsse aus dem Landesinneren in die Küstenebenen bringen. In der Regenzeit staut sich das Wasser und überflutet den Waldboden monatelang.

nach verhinderte ein dichter Pflanzenwuchs die Erkennung der Brandflächen. Deshalb nutzten wir zusätzlich Daten des europäischen Radarsatelliten ERS-2.

Wir entwickelten ein Verfahren, mit dem sich die Brandfläche anhand von unmittelbar vor und nach den Bränden aufgenommenen Radarbildern sehr genau ermitteln lässt. Es ist so sensitiv, dass man auch unterschiedliche Feuerschäden auseinander halten kann. Wenn zum Beispiel auf der Fläche eines Hektars nur ein Viertel aller Bäume verbrannt ist, so erhält man ein stärkeres Signal, als wenn mehr als die Hälfte der Vegetation vernichtet wurde. Mittels Radardaten, die während der Feuer aufgenommen wurden, kann man sogar die Ausbreitung und räumliche Dynamik der Waldbrände untersuchen.

Zur Kontrolle der Brandflächenkartierung verwendeten wir ein drittes Satellitensystem, den amerikanischen NOAA-AVHRR-Wettersatelliten. Die davon gewonnenen Informationen über aktiv brennende Feuer waren nützlich, um Trockenschäden auszuschließen, die unter Umständen in den Landsat- oder ERS-Bildern mit Brandschäden verwechselt werden könnten.

Wenn Torfwald brennt

Die kombinierte Auswertung der Satellitendaten zeigte, dass in dem 2,4 Millionen Hektar großen Untersuchungsgebiet 32 Prozent (800000 Hektar) der Fläche verbrannten. Die größten Schäden waren in unmittelbarer Nähe zu den Bewässerungskanälen erkennbar, während Gebiete mit intakter Hydrologie kaum brannten. Nach unserer Berechnung zerstörten die Feuer 51,3 Prozent des trockengelegten Gebiets. Außerhalb betrug der Anteil nur 19 Prozent.

Fast die Hälfte der Brandfläche waren Torfwälder, die zum Teil noch ungestört und zum Teil durch Holzfäller geöffnet waren. Der Rest betraf stark ausgelichtete, durch Feuer und Holzeinschlag massiv degradierte Wälder, Buschland oder landwirtschaftliche Flächen. Die Schadensanalyse innerhalb einer Vegetations- oder Nutzungsklasse lieferte ein eindeutiges Ergebnis: je gestörter der Wald durch menschliche Eingriffe, desto größer die durch Feuer verursachten Schäden. Während nur vier Prozent von 217000 Hektar des »primären«, also völlig ungestörten Torfsumpfwalds verbrannten, vernichtete Feuer dreißig Prozent von 1020000 Hektar der zuvor holzwirtschaftlich genutzten Torfsumpfwälder – und sogar mehr als siebzig Prozent der zuvor schon stark degradierten Wälder.

Dieses aus ökologischer Sicht ungemein wichtige Ergebnis konnten wir im Rahmen einer anderen von der GTZ geförderten Studie bestätigen. In der Provinz Ost-Kalimantan auf Borneo kartierten wir anhand von Radardaten die gesamte Brandfläche in der Provinz. Im Jahr 1998 verbrannten hier insgesamt 5,2 Millionen Hektar, das entspricht der Fläche der Schweiz. Die Aufnahmen des NOAA-Wettersatelliten zeigten zwischen Januar und April 1998 in ganz Ost-Kalimantan über 60000 Brandherde.

Indem wir mit den Landsat-Daten die holzwirtschaftlich genutzten und die völlig ungestörten Wälder getrennt erfassten, konnten wir den Zusammen- ▷

▷ hang zwischen Holzeinschlag und Feuergefährdung aufzeigen: Nur dort, wo das Kronendach des Regenwalds durch Holzeinschlag geöffnet war, konnte das Feuer zerstörerische Kraft entwickeln. Wenn die Sonne den Waldboden erreicht, setzen sich Licht liebende Pionierpflanzen durch, die bei Dürre absterben und idealen Brennstoff darstellen. Zudem hinterlassen die Holzfäller tote Biomasse in Mengen. Von jedem eingeschlagenen Baum bleiben die gesamte Baumkrone und die Brettwurzel ungenutzt zurück. Dieses Material trocknet mit der Zeit aus und liefert den Flammen noch mehr Nahrung. Ein geschlossenes Laubdach dagegen hält die Luft darunter immer feucht, die Bodenvegetation ist relativ

Ökoforschung per Satellit

Analyse der Waldbrände

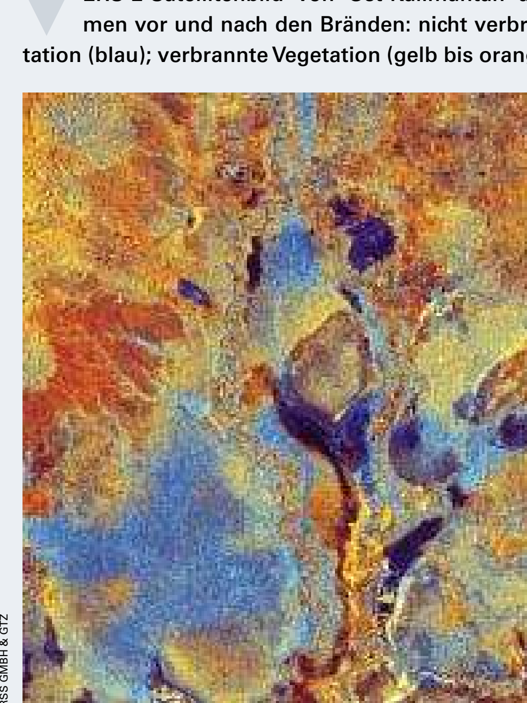
Die Erdbeobachtung mit Satelliten wird bei ökologischen und klimatischen Untersuchungen immer wichtiger. Die hier vorgestellten Analysen stützen sich weitgehend auf Daten verschiedener Satellitensysteme, die wir auswerteten und mit vor Ort gewonnenen Daten kombinierten. Wichtigste Datenquelle waren die multispektralen Farbbilder der amerikanischen Landsat-Satelliten TM 5 und 7. Sie haben dreißig Meter Auflösung am Boden und erlauben, die einzelnen Regenwaldarten sowie Baumplantagen, Ackerland und brachliegende Busch- und Grasflächen zu klassifizieren. Zur Brandzeit und in der heftigen Regenperiode danach verhinderten die Rauch- und Regenwolken brauchbare Landsat-Bilder. Deswegen zogen wir Daten von Radarsatelliten hinzu. Aus dem zurückgestreuten Anteil des Radarsignals lässt sich ein Bild der Erdoberfläche erstellen. Die Aufnahmen des europäischen Systems ERS 2 erreichen mittels spezieller Antennen bis zu 25 Meter Bodenauflösung. Sie können die Erdoberfläche zu jeder Tages- und Nachtzeit abbilden. Wolken und Rauch sind kein Hindernis. Mit Hilfe dieser Daten konnten wir Fläche und Dynamik der Brände bestimmen. Mit einer Vielzahl unterschiedlicher Instrumente bietet der im März 2002 gestartete Europäische Umweltsatellit Envisat noch wesentlich bessere Möglichkeiten.

Des Weiteren nutzten wir Aufnahmen des amerikanischen NOAA-Wettersatelliten, der täglich Bilder mit einem Kilometer Auflösung aufnimmt und auch Bodentemperaturen erfassen kann. Diese Daten hatte das indonesisch-deutsche Integrated Fire Management Project (IFFM) der GTZ mit Sitz in Samarinda (Ost-Kalimantan) aufgezeichnet. Die Bilder zeigen aktiv brennende Feuer. Anhand dieser fast täglich verfügbaren so genannten Hotspots lässt sich die zeitliche und räumliche Dynamik der Feuerausbreitung analysieren. Wir konnten mit Hilfe dieser Aufnahmen außerdem Verwechslungen von reinen Trocken- mit Brandschäden auf den Radarbildern vermeiden.

RSS GMBH & GTZ

◀ **Karte der Brandflächen und -schäden in Ost-Kalimantan nach ERS-2-Radarsatellitendaten: Der Verlauf von gelb nach dunkelrot zeigt die zunehmenden Vegetationsschäden.**

▼ **ERS-2-Satellitenbild von Ost-Kalimantan aus Aufnahmen vor und nach den Bränden: nicht verbrannte Vegetation (blau); verbrannte Vegetation (gelb bis orange).**



RSS GMBH & EUROPÄISCHE RAUMFAHRTAGENTUR ESA

karg und das Feuer findet wenig Nahrung. Zu ähnlichen Ergebnissen kamen vor uns mit anderen Methoden Forscher, welche die Auswirkungen von Feuer im Amazonasregenwald untersuchten.

Aber nicht nur die Brandursachen, die Brandfläche und der Zerstörungsgrad der Wälder interessierten. Vor allem wollten wir berechnen, wie viel Biomasse bei den Torfbränden 1997 in Flammen und Rauch aufgegangen war. Wie groß war die Menge, die aus den brennenden Wäldern stammte, und wie groß die Menge aus dem Torf? Gerade die Freisetzung fossiler Kohlenstoffe gilt als wichtiger Faktor für die beobachtete globale Klimaerwärmung. Die einst von Pflanzen synthetisierte, im Torf – und später in Kohle – komprimiert gespeicherte Biomasse verbrennt unter anderem zu Kohlendioxid. Klimaforscher vermuten, dass der in letzter Zeit gemessene Anstieg dieser Verbindung in der Atmosphäre entscheidend zur weltweiten Klimaveränderung beiträgt.

Globale Klimawirkung

Um die Menge des in den Torflagern gespeicherten Kohlenstoffs und des freigesetzten CO_2 abschätzen zu können, war es notwendig, neben der Brandfläche und der verbrannten Vegetation auch die Menge des gelagerten und des verbrannten Torfs zu ermitteln. Dies war nur mit Hilfe umfangreicher Torfbohrungen möglich. Dazu maßen unsere indonesischen Kollegen zunächst die Dicke der Torfschicht. In monatelanger Schwerstarbeit führten sie auf einer 3800 Quadratkilometer großen Fläche des Untersuchungsgebiets von Zentral-Kalimantan mehrere hundert Bohrungen durch, die mittels Satellitenpeilung in einem regelmäßigen Gitter über das Gelände verteilt waren. Mittels eines geografischen Informationssystems ließ sich daraus das Volumen berechnen. Wie sich herausstellte, reichen die Torflager in diesem Gebiet stellenweise über acht Meter tief. Im Mittel sind sie 2,3 Meter dick.

Insgesamt ist auf der vermessenen Testfläche das gigantische Volumen von 0,4 bis 0,8 Gigatonnen (Milliarden Tonnen) Kohlenstoff im Torf gespeichert. Hochgerechnet auf Indonesien ergibt das zwischen 25 und 50 Gigatonnen.

In einer zweiten Messreihe wurde bestimmt, wie tief die Feuer in die Torflager eindrangen. Im Durchschnitt verbrannten etwa fünfzig Zentimeter Torf, maximal bis zu zwei Meter (Bild oben). Diesen Durchschnittswert haben wir mit der aus den Satellitendaten ermittelten Brandfläche multipliziert und den Kohlenstoff aus der verbrannten Waldvegetation hinzuaddiert. Hochgerechnet auf alle verbrannten Torfgebiete in Indonesien ergab dies die gigantische Menge von 0,8 bis 2,5 Gigatonnen Kohlenstoff, die 1997/98 allein durch Torfbrände freigesetzt wurden. Nur etwa zwanzig Prozent davon stammten von verbrannter Vegetation. (Die Schwankungsbreite ergibt sich aus Unsicherheiten der Bestimmung der Torfwaldfläche sowie der Brandfläche in Torfgebieten für ganz Indonesien.)

Dieser Beitrag – aus einem für globale Maßstäbe vergleichsweise sehr kleinen Gebiet – entspricht zwischen 13 und 40 Prozent des weltweiten Kohlendioxidausstoßes durch Verbrennung von Erdöl, Kohle und Gas im selben Jahr. Messstationen auf Hawaii registrierten für 1997 einen fast doppelt so hohen Anstieg der atmosphärischen CO_2-Konzentration wie in den Jahren zuvor und danach. Diese Steigerung ist seit Beginn der Messungen im Jahr 1957 ohne Beispiel. Die Brände in Indonesien haben zu diesem Anstieg wesentlich beigetragen. Zwei andere Studien zur CO_2-Freisetzung durch Waldbrände stützen unsere These.



ADI JAYA

Anhand der vom Feuer freigelegten Wurzeln haben die Forscher unmittelbar nach den Bränden die vernichtete Torfmenge abgeschätzt.



RSS GMBH & LANDSAT, USGS

Die vernichteten Torfwälder sind auf diesem Landsat-Falschfarbenbild vom August 1998 deutlich sichtbar: Unverbrannte Vegetation erscheint grün, verbrannte rot.

Steigende Gefahr für neue Brände

Bisherige Klimamodelle berücksichtigen den CO_2-Ausstoß brennender Regenwälder nicht. Bedenkt man, dass noch nicht einmal der zehnte Teil des in Indonesien lagernden Torfs in Flammen aufgegangen ist, zeigt dies das klimawirksame Potenzial künftiger Feuerkatastrophen. Bereits im Herbst 2002, einem schwachen El-Niño-Jahr, sind wieder mehrere hunderttausend Hektar Torfwald Zentral-Kalimantans verbrannt, von der Weltöffentlichkeit kaum beachtet.

Auch die Medien etwa in Deutschland berichten eher von den klimatisch gesehen viel nebensächlicheren Waldbränden in Australien, Portugal oder den Vereinigten Staaten. Kaum jemandem ist bewusst, dass 1997 und 1998 in Indonesien zehn- bis zwanzigmal so viel Kohlendioxid in die Atmosphäre stieg wie Deutschland in den letzten zehn Jahren im Rahmen der Klimapolitik mit Milliardenaufwand eingespart hat. Eine global gesehen eher kleine Region kann so binnen Monaten die Anstrengungen Vieler zunichte machen. Wollte man diese CO_2-Mengen mit neu angepflanztem ▷

FLORIAN SIEGERT

In desolatem Zustand sind heute weite Flächen des Torfsumpfwalds in Zentral-Kalimantan. Die toten Bäume steigern das Risiko für neue Waldbrände extrem.

Wald wieder auffangen, müsste man über 200 000 Quadratkilometer Land aufforsten, eine Fläche zweieinhalbmal so groß wie Österreich, und dreißig Jahre warten.

Politisches Versagen

Die Asian Development Bank schätzte 1999 den volkswirtschaftlichen Verlust durch die Brandkatastrophe von 1997/98 auf über 9 Milliarden Euro. Darin enthalten waren mangels Daten nicht einmal Faktoren wie das verlorene exportierbare Tropenholz (nach unserer Analyse über 2 Milliarden Euro) oder andere vernichtete biologische Ressourcen. Der Schätzwert der Bank betraf nur etwa Einnahmeausfälle im Tourismus und rauchbedingte Gesundheitskosten.

Unsere Untersuchungen zeigen, dass die Feuer erst durch das Zusammenwirken mehrerer Faktoren ein so dramatisches Ausmaß annehmen. Ungestörte Torf- und Tieflandregenwälder brennen kaum, auch nicht nach mehreren Monaten Trockenheit, wie sie nur während eines besonders starken El Niño auftreten können. Erst die Kombination von langer Trockenheit und einer falschen Entwicklungs- und Landnutzungspolitik führen in die Katastrophe. Zurzeit ist illegaler Holzeinschlag in Indonesien das größte Problem. Durch eine holzwirtschaftliche (Über-)Nutzung sowie die Trockenlegung der Torfsümpfe wird die natürliche Luft- und Bodenfeuchtigkeit so weit abgesenkt, dass der Torfboden und die Vegetation Feuer fangen können.

Zudem setzt in Regenwäldern, die einmal gebrannt haben, eine verhängnisvolle Wirkungskette ein. Untersuchungen im Amazonasregenwald wiesen auf, dass die Wahrscheinlichkeit dafür, dass ein Waldgebiet ein zweites Mal brennt, wesentlich höher ist als für das erste Mal. Feuer bereitet sich so gesehen selbst den Weg: In feuergeschädigtem Wald herrscht ein trockeneres Mikroklima, und schnell wachsende Pionierpflanzen, die besonders anfällig für Trockenheit sind, geben ein ideales Brennmaterial ab. Es entsteht eine positive Rückkoppelung, wie es der amerikanische Feuerökologe Mark A. Cochrane vom Woods-Hole-Forschungszentrum (Massachusetts) ausdrückt. Je öfter das Feuer kommt, desto wahrscheinlicher und verheerender brennt es. Endstation dieses Zyklus ist eine feuerresistente artenarme Savannenvegetation, in Indonesien Alang-Alang genannt. Die Theorie bestätigen aktuelle Ergebnisse aus dem Jahr 2002: 61,5 Prozent der 1997 verbrannten Fläche stand im Jahr 2002 wieder in Flammen.

Es wird massiver internationaler Anstrengungen bedürfen, damit die tropischen Torfwälder Südostasiens und die mächtigen Torfböden in den nächsten Jahren nicht vollständig in Rauch aufgehen. Indonesien wird das kaum allein leisten können. Leider hat die Bundesregierung die Entwicklungszusammenarbeit mit dem Land in diesem Bereich kürzlich beendet. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



Florian Siegert ist Professor für Erdbeobachtung und Umweltmonitoring am GeoBio-Center der LMU München und leitet die Firma Remote Sensing Solutions GmbH mit Hauptsitz in München.

Feuer in Waldökosystemen der Tropen und Subtropen. Von J. G. Goldammer. Basel 1993

Fire science for rainforests. Von Mark A. Cochrane in: Nature, Bd. 421, S. 913 (27. Febr. 2003)

The amount of carbon released from peat and forest fires in Indonesia during 1997. Von S. E. Page et al. in: Nature, Bd. 420, S. 61 (7. Nov. 2002)

Increased damage from fires in logged forests during droughts caused by El Niño. Von F. Siegert et al. in: Nature, Bd. 414, S. 437 (22. Nov. 2001)

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Quantenradierer

In der Mikrowelt hat jedes Ereignis sowohl einen Wellen- als auch einen Teilchenaspekt – aber nur einer von beiden lässt sich zu gegebener Zeit beobachten. Ausgetüftelte Experimente zeigen, wie durch Löschen des einen Aspekts der andere erscheinen kann.

Von Stephen P. Walborn, Marcelo O. Terra Cunha, Sebastião Pádua und Carlos H. Monken

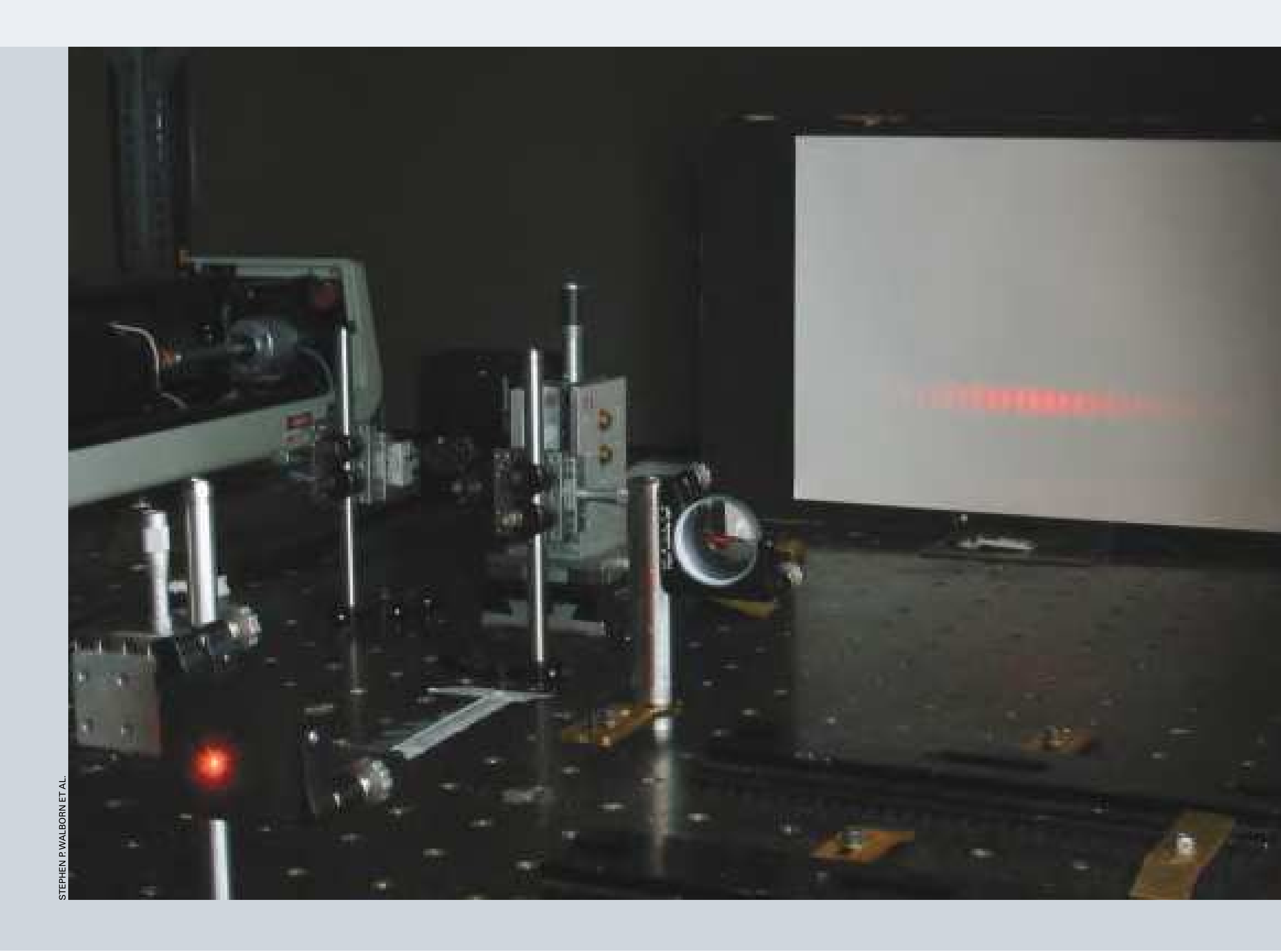
Ein englischer Gelehrter führte im Jahre 1801 eines der berühmtesten Experimente in der Geschichte der Physik durch. Zwei Jahre später beschrieb er es in einem Vortrag vor der Londoner Royal Society:

»Ich bohrte ein kleines Loch in eine Jalousie und bedeckte es mit einem dicken Stück Papier, das ich mit einer feinen Nadel durchstochen hatte … Ich brachte in den Sonnenstrahl einen Kartenstreifen, der nur ein dreißigstel Inch [0,8 Millimeter] breit war, und beobachtete seinen Schatten, entweder an der Wand oder auf anderen Karten, die ich in verschiedenen Abständen hielt.«

Was Young auf der gegenüberliegenden Wand sah, war nicht wie erwartet ein einzelner dünner Schatten, sondern eine ganze Reihe von hellen und dunklen Streifen in gleichen Abständen, wobei der mittlere Streifen stets hell blieb. Wenn er das Licht auf einer Seite des schmalen Kartenstücks blockierte, verschwanden die Streifen. Daraus schloss er, dass das Muster nur entstand, wenn das Licht beide Seiten der Karte passierte. Aber wie konnten zwei Lichtstrahlen zusammen einen dunklen Streifen erzeugen? Und warum war das Zentrum des Schattens nicht dunkel, sondern stets hell? Das lässt sich kaum erklären, wenn das Licht – wie Isaac Newton und viele andere Physiker postulierten – aus Partikeln bestehen soll, die sich stets als gerade Strahlen ausbreiten.



Mit seinem »Kartentrick« löste Young eine Revolution der Physik aus, deren Nachbeben noch immer andauern. Sein Experiment gehört heute in jedes physikalische Anfängerpraktikum; dort wird es meist mit zwei in schwarzen Mikrofilm geätzten Schlitzen als »Doppelspaltversuch« durchgeführt. Das von Young beobachtete Phänomen – die Interferenz – lässt sich ganz einfach mit Wellen in einem Wassertank veranschaulichen. Somit schien sein Experiment zu



STEPHEN P. WALBORN ET AL.

▲ In einer modernen Version des klassischen Doppelspaltversuchs von Thomas Young beleuchtet ein Helium-Neon-Laser ein Stück Mikrofilm, in das zwei Spalte in 0,1 Millimeter Abstand geätzt wurden. Anschließend passiert der Laserstrahl eine Streulinse (Mitte), die ein vergrößertes Bild der Interferenzstreifen auf den Schirm im Hintergrund wirft.

beweisen, dass Licht aus Wellen besteht, wie der niederländische Physiker Christiaan Huygens angenommen hatte. Aber damit war diese Geschichte noch nicht zu Ende.

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts entdeckten die Physiker, dass Licht sich in mancher Hinsicht doch so verhält, als bestünde es aus Teilchen – kleinsten Strahlungsquanten oder Photonen. 1909 wiederholte Geoffrey Taylor an der Universität Cambridge eine Variante von Youngs Experiment und demonstrierte an einzelnen Photonen ein weiteres Interferenzphänomen, die Brechung. Indem Taylor das Licht so sehr abschwächte, dass nur noch ein Photon nach dem anderen den Schirm erreichte, schloss er jede Möglichkeit von Interferenz zwischen den Photonen aus. Dennoch fand er, nachdem er das Resultat vieler einzelner Photonendurchgänge registriert hatte, dasselbe Muster von Brechungsstreifen wie bei stärkerem Licht. Offensichtlich vermag ein einzelnes Photon mit sich selbst zu interferieren.

Das gilt nicht nur für Photonen. Materieteilchen wie Elektronen, Neutronen und sogar Fulleren-Moleküle aus sechzig Kohlenstoffatomen zeigen dasselbe wellenartige Verhalten. Die Selbst-Interferenz einzelner Teilchen ist das größte Rätsel der Quantenphysik; der amerikanische Nobelpreisträger Richard Feynman nannte es sogar »das einzige Geheimnis« der Quantentheorie.

Das Prinzip der verzögerten Wahl

Kürzlich haben Physiker dieses Geheimnis mit Hilfe so genannter Quantenradierer ein wenig gelüftet; dabei lassen sich die Interferenzstreifen tatsächlich nach Belieben ein- und ausschalten. Unsere Gruppe hat mittels einer verfeinerten Version des Young'schen Experiments einen Quantenradierer konstruiert und damit das Prinzip der »verzögerten Wahl« demonstriert: Der Experimentator kann seine Entscheidung für Welle oder Teilchen sogar noch fällen, nachdem das Teilchen nachgewiesen wurde. Das Experiment mit verzögerter Wahl mutet an wie eine Veränderung der Vergangenheit. Doch wie wir erklären werden, ändern Quantenradierer die Geschichte nicht wirklich. Aber sie verdeutlichen, wie Interferenzphänomene in der Quantenmechanik entstehen.

Warum im klassischen Doppelspaltversuch Interferenzstreifen auftreten, ist ▷

▷ kein Geheimnis. Gemäß der Wellentheorie des Lichts überlagern sich zwei kohärente Lichtstrahlen gleicher Wellenlänge. Die Extremfälle sind konstruktive Interferenz – die Wellen verstärken einander – und destruktive Interferenz, das heißt völlige Auslöschung.

Bei Youngs Versuch sind die Wege von jedem Spalt zu einem gegebenen Beobachtungspunkt in der Regel nicht gleich lang. Wenn sie gleich sind – das heißt, wenn der Beobachtungspunkt symmetrisch zwischen den Schlitzen liegt –, treffen die Wellen einander in Phase und interferieren konstruktiv. Das erklärt, warum Young in der Mitte des »Schattens« seiner Karte immer einen hellen Streifen sah. Zu beiden Seiten dieses Mittelstreifens liegt ein Gebiet, zu dem die eine Welle exakt eine halbe Wellenlänge mehr zurücklegen muss als die andere. Dort interferieren die Wellen destruktiv, und ein dunkler Streifen erscheint. Als Nächstes kommt eine Region, bis zu der die eine Welle exakt eine ganze Wellenlänge mehr braucht als die andere; hier gibt es wiederum konstruktive Interferenz und einen hellen Streifen.

Der Wurf der Quantenmünze

Um das Unerwartete an der Quanteninterferenz zu verstehen, betrachten wir zunächst einen Münzwurf. Bei einer fairen Münze ist die Wahrscheinlichkeit für Kopf 50 Prozent und für Zahl ebenso. Die Wahrscheinlichkeit *W* dafür, Kopf oder Zahl zu erhalten, ist die Summe der individuellen Wahrscheinlichkeiten:

W (Kopf oder Zahl) =
W (Kopf) + *W* (Zahl) = 100 Prozent

Nun betrachten wir einen »Quantenmünzwurf«, der auf Youngs Versuch beruht. Wir werfen einen Lichtstrahl auf den Doppelspalt und platzieren dahinter in gewissem Abstand einen Photodetektor. Um das Paradox zuzuspitzen, bringen wir den Detektor in die Mitte eines dunklen Interferenzstreifens. Nun schwächen wir das Licht so sehr ab, dass nur noch ein Photon nach dem anderen den Doppelspalt passiert. Zuerst bedecken wir Spalt 2 und finden beispielsweise, dass 5 Prozent der Photonen durch Spalt 1 gehen und den Detektor auslösen. Das heißt, *W* (Spalt 1) = 5 Prozent. Dann blockieren wir Spalt 1 und stellen das Gleiche bezüglich Spalt 2 fest: *W* (Spalt 2) = 5 Prozent. Jetzt geben wir beide Spalte frei, öffnen damit zwei mögliche Pfade und würden erwarten, 10 Prozent der Photonen nachzuweisen.

Doch weit gefehlt. Da wir den Detektor in einen dunklen Streifen platziert haben, können wir das Experiment stundenlang fortsetzen, ohne ein einziges Photon zu sehen. Das heißt:

W (Spalt 1 oder Spalt 2) = 0 Prozent
≠ *W* (1) + *W* (2)

Die unanschauliche Erklärung der Quantenphysiker für dieses überraschende Verhalten ist das Superpositionsprinzip. Es besagt, dass wellenartige Ereignisse sich nicht gemäß einer Wahrscheinlichkeit zusammensetzen, sondern gemäß einer Wahrscheinlichkeitsamplitude. Mathematisch gesprochen handelt es sich dabei nicht um eine positive reelle Zahl, sondern um eine komplexe Zahl wie 0,1 + 0,2 i, wobei i für die Quadratwurzel aus –1 steht.

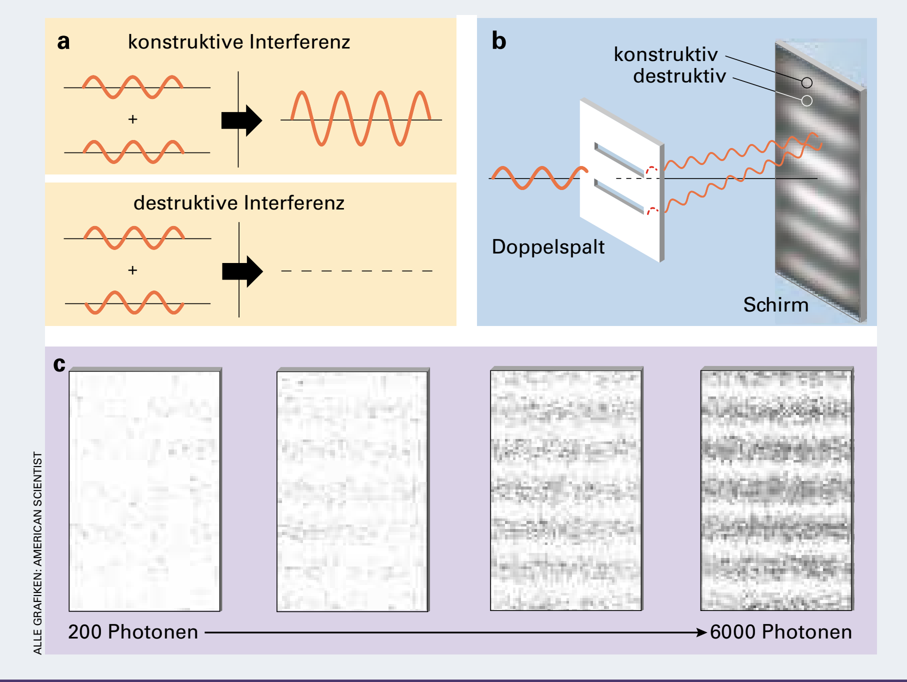
Philosophisch betrachtet ist die Bedeutung von Wahrscheinlichkeitsamplituden nach wie vor ein großes Rätsel. Jedenfalls verhält sich eine »Quantenmünze« nicht wie ein klassisches Geldstück. Infolge des Superpositionsprinzips kann ein Photon – unsere »Quantenmünze« – eine Kombination von Kopf und Zahl darstellen.

Wem all das ziemlich unglaublich vorkommt, der ist in guter Gesellschaft. Schon die Schöpfer der Quantenphysik stritten um die Grundbegriffe, und einige akzeptierten die Theorie, die sich ihnen aufdrängte, bis zuletzt nicht. Max Planck postulierte zwar im Jahre 1900 als Erster, Licht verhalte sich so, als bestünde es aus Quanten, aber er hielt das nur für eine Art mathematischen Trick, der eher zufällig zu den experimentellen Daten passe.

Hingegen akzeptierte Einstein zwar die Existenz der Lichtquanten, war aber mit der späteren Entwicklung der Quantentheorie gar nicht einverstanden. Er

Ein Lichtquant interferiert mit sich selbst

Interferenz ist ein typisches Wellenphänomen. Wenn zwei Lichtwellen in Phase sind, verstärken sie einander; wenn sie eine halbe Wellenlänge versetzt schwingen, löschen sie einander aus (a). Nach Durchgang durch den Doppelspalt tritt konstruktive Interferenz dort ein, wo die Wege der beiden Strahlen gleich lang sind – in der Mitte des Schirms – oder sich um ganze Wellenlängen unterscheiden. Wo die Wegdifferenz eine halbe Wellenlänge oder ein Vielfaches davon beträgt, entstehen durch destruktive Interferenz dunkle Streifen (b). Sogar wenn das Licht so schwach ist, dass immer nur ein Photon nach dem anderen den Doppelspalt passiert, erscheinen mit der Zeit – wie in dieser Computersimulation – die typischen Interferenzstreifen (c). Offenbar kann ein Photon durch beide Spalte gleichzeitig gehen und mit sich selbst interferieren.



konnte sich nicht an die Idee gewöhnen, dass das, was wir beobachten und infolgedessen real nennen, ein Zufallsprodukt sein soll – denn die Quantenmechanik handelt von Wahrscheinlichkeiten und sagt darum nichts darüber, wo das Photon ist, sondern nur, wo es mit welcher Wahrscheinlichkeit auftauchen wird.

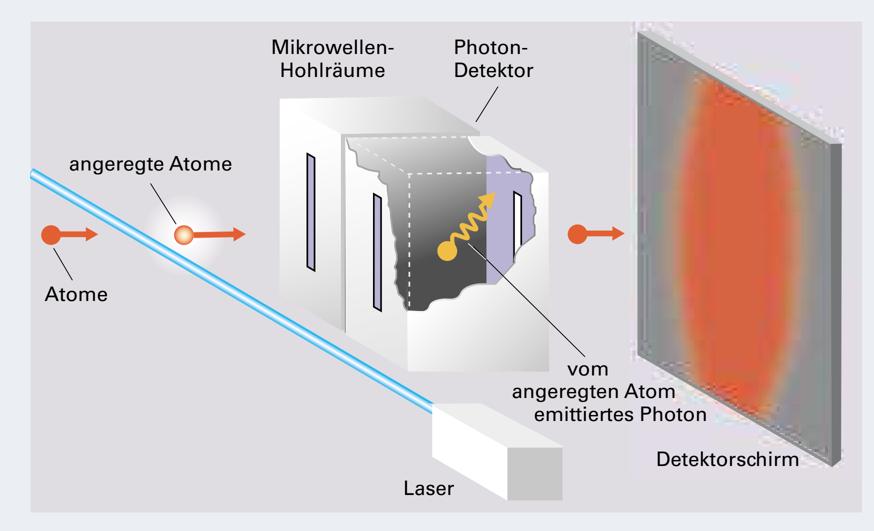
Einstein widersetzte sich auch der Folgerung, diese Realität existiere nur dann in einem eindeutigen Zustand, wenn wir sie beobachten. Er drückte diese Unzufriedenheit gegenüber Abraham Pais mit den Worten aus: »Glauben Sie, dass der Mond nur existiert, wenn Sie ihn anschauen?« Interessanterweise war vor allem Einsteins Kritik immer wieder Anlass für wichtige Untersuchungen über die Grundlagen der Quantenmechanik.

Ende der 1920er Jahre formulierte der dänische Physiker Niels Bohr die »Kopenhagener Deutung«; sie ist bis heute die am breitesten akzeptierte Methode, den Paradoxien der Quantenphysik auszuweichen. Insbesondere besagt Bohrs Komplementaritätsprinzip, dass bei komplementären Beobachtungsgrößen – wie Ort und Impuls – die genaue Kenntnis der einen jede Kenntnis der anderen ausschließt. Der Ort ist eine »teilchenartige« Observable: Ein Teilchen hat eine bestimmte Position im Raum, eine Welle nicht. Hingegen ist der Impuls eine wellenartige Observable; 1927 postulierte Louis de Broglie, dass ein Teilchen, etwa ein Elektron, mit einem bestimmten Impuls auch eine bestimmte Wellenlänge erwirbt. Nach Bohr ist jedes Quantenobjekt sowohl Welle als auch Teilchen, und das Verhalten, das wir beobachten, hängt einfach von der Art der Messung ab, die wir wählen. Wenn wir eine teilchenartige Eigenschaft messen, dann zeigt das Objekt teilchenartiges Verhalten. Entschließen wir uns später, eine wellenartige Eigenschaft zu messen, werden wir wellenartiges Verhalten beobachten. Doch beides zugleich geht nicht.

Bei mehreren Gelegenheiten suchte Einstein in der Kopenhagener Deutung Lücken nachzuweisen. Unter anderem heckte er folgendes Gedankenexperiment aus: Eine Blende mit Doppelspalt hängt an empfindlichen Federn, sodass sie frei schwingen kann. Wenn ein Photon am Doppelspalt gestreut wird, versetzt es der Blende einen schwachen Stoß. Indem ein Beobachter den Rückstoß des Geräts sowie die spätere Position des Photons registriert, könnte er feststellen, durch welchen Spalt das Photon gegangen ist. Zugleich, so Einstein, würde die – erst nach Durchgang des Photons vollzogene – Rückstoßmessung die Trajektorie des Photons nicht verändern, und darum wären weiterhin die Interferenzstreifen zu beobachten. Aus dem Abstand der Streifen ginge die Wellenlänge hervor, zweifellos eine wellenartige Eigenschaft. Somit wären sowohl Impuls als auch Trajektorie bekannt – und das Komplementaritätsprinzip wäre widerlegt.

Ein hypothetischer Quantenradierer

Im Gedankenexperiment von Scully, Englert und Walther tritt ein mittels Laser hoch angeregtes Atom durch einen Doppelspalt. Dahinter liegen zwei Mikrowellen-Hohlräume, in denen das Atom spontan ein Photon emittiert und dadurch zu erkennen gibt, durch welchen Spalt es gegangen ist. Nach Bohrs Komplementaritätsprinzip hat es durch die Preisgabe von »Welcher-Weg-Information« Teilchencharakter angenommen und kann sich nicht mehr wie eine Welle verhalten. Darum entsteht bei wiederholten Durchläufen auf dem Schirm kein Interferenzstreifenmuster, sondern ein diffuser Fleck. Nun kommt der »Quantenradierer« ins Spiel: Durch Entfernen der Trennwand zwischen den Hohlräumen wird die Welcher-Weg-Information gelöscht und die Interferenz wiederhergestellt.



Doch Bohr entdeckte rasch einen Fehler in Einsteins Argument. Er berief sich dabei auf Heisenbergs Unbestimmtheitsprinzip. Dieses Grundprinzip der Quantenmechanik gibt trotz seines vage klingenden Namens sehr bestimmt Auskunft über die höchstmögliche Präzision, mit der komplementäre Variable gemessen werden können. Der Rückstoß des Doppelspaltgeräts stört das System unausweichlich und erzeugt eine gewisse Unbestimmtheit beim Nachweis des Photon-Orts auf dem Detektorschirm. Diese Unbestimmtheit reicht gerade aus, die Interferenzstreifen so zu verschmieren, dass der Impuls nicht mehr gemessen werden kann.

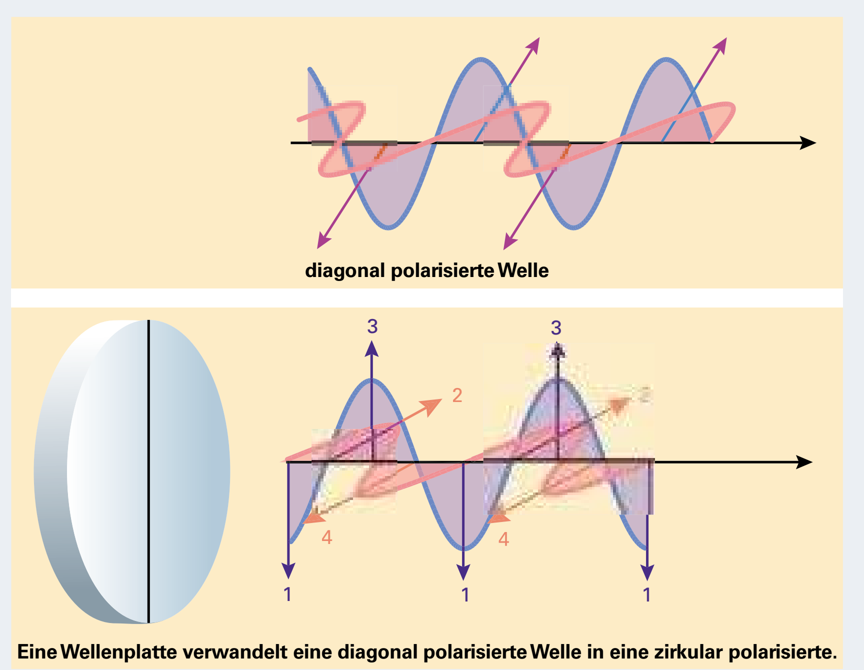
Viele Jahre lang galt Heisenbergs Prinzip als Garant der Komplementarität. Erst spät kam die Hypothese auf, die Komplementarität sei fundamental, und die Position eines Teilchens lasse sich auf eine Weise markieren, die seinen Impuls nicht verändert. Diese Idee führt zu einer Klasse von Experimenten, die Quantenradierer genannt werden.

Welcher Weg?

Vor rund zwanzig Jahren sorgten Marlan O. Scully und Kai Drühl – damals am Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching und an der University of New Mexico – unter Quantenphysikern für einiges Aufsehen. Sie behaupteten: Wenn die Information über die Trajektorie des Objekts ohne merkliche Störung gewonnen werden kann, dann sollte die Interferenz verschwinden, weil die Komplementarität das verlangt. Doch wenn diese Information anschließend »ausradiert« wird, sollte die Interferenz wiederkehren. Man könnte sogar sagen: »Interferenz ist gleich Ignoranz« (über den Weg des Teilchens). ▷

Polarisation als Welcher-Weg-Information

Unsere Version des Quantenradierers verwendet die Polarisation als Wegmarkierung. Eine Lichtwelle besteht aus elektrischen und magnetischen Wechselfeldern; wir zeigen nur das elektrische Feld (oben). Da es im gezeigten Fall gleich große horizontale und vertikale Komponenten hat (rot und blau), ist die Welle diagonal polarisiert (violette Pfeile). Eine so genannte Wellenplatte verlangsamt eine Komponente um eine Viertelwellenlänge (unten). Dadurch rotiert das resultierende elektrische Feld (nummerierte Pfeile) gegen den Uhrzeigersinn um die Fortpflanzungsrichtung; es entsteht eine linkszirkular polarisierte Welle. Verlangsamung der anderen Komponente hätte eine rechtszirkular polarisierte Welle erzeugt. Steht die Achse der Wellenplatte vertikal, verwandelt sie diagonal polarisiertes Licht in zirkular polarisiertes. Steht die Achse diagonal unter 45 Grad, so verwandelt sie vertikal polarisiertes Licht in zirkular polarisiertes.



Eine Wellenplatte verwandelt eine diagonal polarisierte Welle in eine zirkular polarisierte.

Später schlugen Scully, Berthold-Georg Englert und Herbert Walther vom Garchinger Max-Planck-Institut für Quantenoptik ein praktisches Verfahren dafür vor. Als interferierendes Objekt dient ein Atom, dessen Elektronen auf ein sehr hohes Energieniveau angeregt sind. Hinter jedem Spalt liegt ein Mikrowellen-Hohlraum; er soll ein Photon einfangen, das vom Atom beim spontanen Übergang in ein niedrigeres Anregungsniveau emittiert wird. Indem der Beobachter einfach nachsieht, welcher Hohlraum das Photon enthält, kann er sagen, durch welchen Spalt das Atom gegangen ist. Aus der Komplementarität folgt, dass die Interferenzstreifen verschwinden müssen. Doch wenn der Experimentator die Trennwand zwischen den zwei Hohlräumen herausnimmt, wird die zusätzliche »Welcher-Weg-Information« gelöscht, und – simsalabim – die Streifen sind wieder da.

Bisher hat niemand den Scully-Englert-Walther-Vorschlag zu realisieren vermocht. Doch wir haben ein analoges Experiment mittels Photonen durchgeführt, das viel weniger Schwierigkeiten macht.

Wir verwenden als Wegmarkierung die Polarisation. Licht hat wie jede elektromagnetische Welle eine Polarisationsrichtung, die aus Konvention durch die Schwingungen des elektrischen Feldes gegeben ist; das magnetische Feld oszilliert immer rechtwinklig zum elektrischen. Die beiden Felder schwingen stets in einer zur Fortpflanzungsrichtung senkrechten Ebene, können aber innerhalb dieser Ebene in verschiedene Richtungen zeigen: vertikal, horizontal, unter plus oder minus 45 Grad zur Waagrechten und so weiter. Sie können sogar während der Fortpflanzung rotieren, so dass die Lichtwelle sich wie eine rechts- oder linkshändige Schraube dreht. Solche Wellen heißen (rechts- oder links-) zirkular polarisiert.

Mit so genannten Wellenplatten lässt sich die Polarisationsrichtung verändern oder ein linear polarisierter Strahl sogar in einen zirkular polarisierten verwandeln. Eine weitere optische Komponente ist ein Polarisator, der nur Licht einer bestimmten Polarisation durchlässt. Passiert ein zirkular polarisierter Strahl einen horizontalen Polarisator, so wird der vertikale Anteil der Welle zurückgehalten, und übrig bleibt nur ein horizontal polarisierter Strahl, der halb so intensiv ist wie der ursprüngliche.

Angenommen, wir wiederholen nun Youngs Experiment mit vielen horizontal polarisierten Photonen. Hinter jeden Spalt setzen wir je eine Viertelwellenplatte, und zwar so, dass die eine Platte die horizontal polarisierten Photonen in rechtszirkular polarisierte verwandelt, die andere in linkszirkular polarisierte. Wie wir erstaunt feststellen, verschwinden die Interferenzstreifen; an ihrer Stelle erscheint ein einzelner Lichtfleck, der im Zentrum am intensivsten ist. Wenn wir die Photonenverteilung grafisch darstellen, erhalten wir eine Glockenkurve.

Verschränkung statt Unbestimmtheit

Was ist mit der Interferenz geschehen? Die Photonen scheinen sich nicht mehr wie Quantenmünzen zu benehmen, sondern wie klassische Objekte. Die Wellenplatten haben jeden Spalt eindeutig mit einer bestimmten Polarisation verknüpft. Mit Hilfe eines Zirkularpolarisators könnten wir die Polarisation messen und feststellen, durch welchen Spalt jedes Photon gegangen ist. Wohlgemerkt, um das Interferenzmuster zu zerstören, müssen wir die Polarisation gar nicht wirklich messen. Es genügt, dass uns die Welcher-Weg-Information im Prinzip zur Verfügung steht. Durch bloßes Dummstellen lässt sich die Interferenz nicht wieder hervorzaubern.

Um einen Quantenradierer vorzuführen, genügt es aber nicht, den Weg des Photons zu markieren; man muss auch zeigen, wie diese Information »ausradiert« werden kann. Wir verwenden dafür einen Linearpolarisator, den wir auf waagrechte Polarisation einstellen und zwischen die Viertelwellenplatten und den Detektor bringen. Wenn wir nun das Experiment wiederholen, sehen

wir statt der Photonen-Glockenkurve ein Interferenzmuster. Es ist, als hätten wir eine Sonnenbrille aufgesetzt und sähen plötzlich alles um uns gestreift.

Aber wir kann das sein? Wie schon gesagt: Wenn wir uns einfach nur dumm stellen, kommt die Interferenz nicht wieder. Warum schafft das ein horizontaler Polarisator? Die Antwort lautet: Er radiert die Welcher-Weg-Information aus. Da unser Horizontalpolarisator sowohl aus einem rechts- als auch aus einem linkszirkular polarisierten Photon ein horizontal polarisiertes herausfiltert, lässt sich kein Unterschied mehr zwischen beiden finden. Ist ein Photon erst einmal durch den Polarisator gegangen, kann niemand mehr sagen, ob es Spalt 1 oder Spalt 2 passiert hat. Befreit von der teilchenartigen Information können die Photonen sich wieder wie Wellen verhalten.

Auch wenn wir einen vertikalen Linearpolarisator zwischen Viertelwellenplatten und Detektor platzieren, radieren wir die Welcher-Weg-Information aus. Doch in diesem Fall beobachten wir so genannte Anti-Streifen, das heißt ein Muster, das nicht nur in der Mitte einen dunklen Streifen zeigt, sondern auch überall sonst das exakte Gegenteil des Musters mit horizontalem Polarisator bildet.

Wir haben damit zwei Möglichkeiten, die Versuchsresultate in Untermengen zu teilen. Mit einem Zirkularpolarisator können wir die Photonen in zwei Gruppen trennen: Die einen haben Spalt 1 passiert und sind rechtszirkular, die anderen sind linkszirkular und durch Spalt 2 gegangen. Mit einem Linearpolarisator können wir zwei ganz andere Gruppen von Photonen organisieren: Die einen ergeben ein Streifenmuster und sind horizontal polarisiert, die anderen erzeugen Anti-Streifen und sind vertikal polarisiert. Das ist das Wesen der Quantenradierung.

Sagt das Unbestimmtheitsprinzip irgendetwas über dieses Experiment aus? Nein. Polarisation und Position sind keine komplementären Variablen, darum gilt das Heisenberg-Prinzip hier ebenso wenig wie für den Scully-Englert-Walther-Vorschlag. Wodurch wird aber dann das Komplementaritätsprinzip erzwungen?

Die Antwort lautet Quantenverschränkung. Wenn ein Photon den Doppelspalt passiert, verwandelt es sich in eine Superposition von Ortszuständen: Spalt 1 + Spalt 2. Die Viertelwellenplatten führen eine zusätzliche bedingte logische Operation durch. Geht das Photon durch Spalt 1, so ist es hinterher rechtszirkular polarisiert, und wenn es Spalt 2 passiert, kommt es linkszirkular polarisiert heraus. Somit ist die Polarisation mit dem Pfad verschränkt worden. Der Zustand des Photons lässt sich als eine neue und kompliziertere Superposition beschreiben:

(Spalt 1 UND rechtspolarisiert) +
(Spalt 2 UND linkspolarisiert)

Weil die zwei Observablen nun verschränkt sind, verändert jedes Manipulieren an der Information über die eine Observable automatisch die Information über die andere. Der Photonzustand lässt sich aber auch völlig äquivalent beschreiben als:

(Streifen UND horizontalpolarisiert) +
(Anti-Streifen UND vertikalpolarisiert)

Wenn wir wieder den Vergleich mit dem Münzwurf heranziehen, so verhalten sich die Orts- und Polarisations-Observablen jetzt wie zwei »telepathische« Geldstücke. Münze 1 zeigt in der Hälfte aller Fälle Kopf, Münze 2 ebenso, und solange man jede von ihnen separat betrachtet, scheint alles ganz normal zu sein. Ihre quantenmechanische Seltsamkeit tritt erst zu Tage, wenn man sie beide beobachtet und entdeckt, dass jedes Mal, wenn Münze 1 Kopf zeigt, Münze 2 das auch tut.

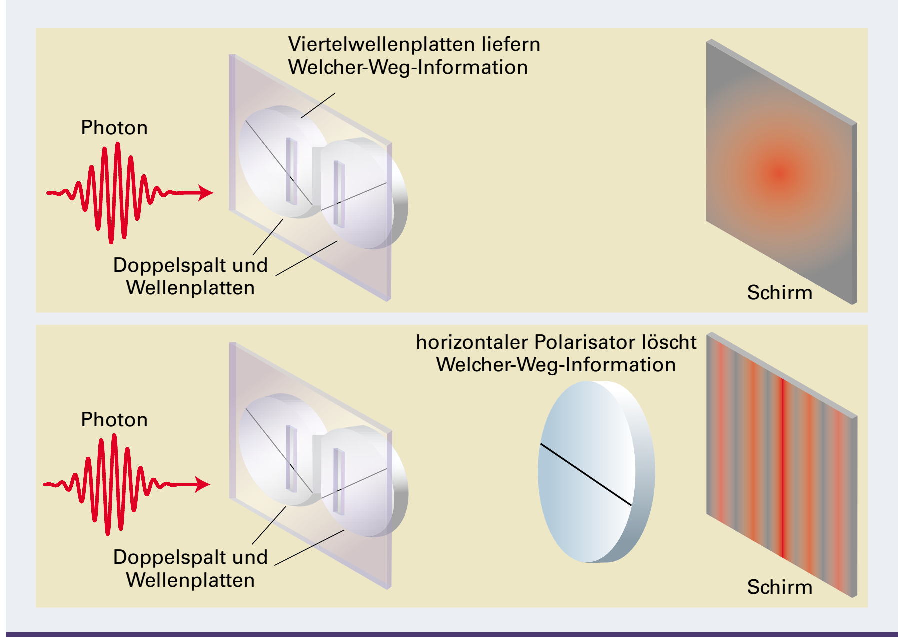
Das hört sich ziemlich sonderbar an. Das fand auch Einstein, und in einem berühmten Artikel mit Boris Podolsky und Nathan Rosen von 1935 behauptete er, telepathische Münzen würden das Komplementaritätsprinzip verletzen. Dennoch ist Quantenverschränkung einfach eine Tatsache. Physiker erproben derzeit – in der Theorie und im Labor – den Einsatz der Verschränkung für Quantencomputer und abhörsichere Datenübertragung.

Veränderung der Geschichte?

Unsere letzte Variante des Young'schen Experiments enthält die Quantenverschränkung auf viel explizitere Weise und erzeugt damit eine scheinbar paradoxe Situation, die ursprünglich von John A. Wheeler vorgeschlagen wurde. Diese so genannte verzögerte Wahl mutet noch spukhafter an als die telepathischen Münzen, denn scheinbar ermöglicht sie ein Manipulieren der Vergangenheit. Doch ▷

Ein Polarisator als Quantenradierer

Bei unserem Quantenradierer werden hinter den Spalten Viertelwellenplatten platziert, welche die Photonen linkszirkular beziehungsweise rechtszirkular polarisieren. Das verschafft dem Beobachter Welcher-Weg-Information, und die Interferenzstreifen verschwinden (oben). Doch ein eingeschobener horizontaler Polarisator (unten) verwandelt beide zirkularen Polarisationen in horizontale, sodass der Unterschied zwischen »linken« und »rechten« Photonen verschwindet. Die Welcher-Weg-Information wird gelöscht, und die Interferenzstreifen – wie von den Autoren im Labor demonstriert – kehren wieder.



wir betonen »scheinbar« – in Wirklichkeit tut sie nichts dergleichen.

Beim Experiment mit verzögerter Wahl erzeugen wir zwei verschränkte Photonen a und b mit folgender Eigenschaft: Wann immer an Photon a horizontale Polarisation beobachtet wird, ist b notwendigerweise vertikal polarisiert, und umgekehrt. Praktisch geschieht dies durch einen nichtlinearen optischen Prozess namens parametrische Oszillation (englisch *spontaneous parametric down-conversion*), wobei wir einen ultravioletten Argon-Laser auf einen dünnen Kristall richten, der daraufhin ein Photonen-»Zwillingspaar« emittiert. Wir manövrieren Photon *a* durch den Doppelspalt und die Viertelwellenplatten zu einem Detektor, während *b* direkt zu einem separaten Polarisationsdetektor geführt wird. Diesmal dient uns die Polarisation von Photon *b* als Kontrolle für den Quantenradierer.

Weil *a* und b verschränkt sind, sagt jede Messung von *b* etwas über *a* aus. Wir können an *b* entweder eine Messung ausführen, die Welcher-Weg-Information über *a* liefert, oder uns für eine Messung entscheiden, bei der die Interferenz erhalten bleibt. Wenn wir die horizontale oder vertikale Polarisation von *b* messen, geht uns die Welcher-Weg-Information nicht verloren. Denn zum Beispiel bedeutet »*a* rechtszirkular UND *b* horizontal«, dass Photon *a* durch Spalt 1 gegangen ist, während »*a* linkszirkular UND *b* horizontal« bedeutet, dass es durch Spalt 2 trat.

Verzögerte Messung auf dem Mars

Um die Welcher-Weg-Information über *a* auszuradieren, können wir stattdessen die diagonale Polarisation von *b* messen. Eine Messung in der positiven Diagonalrichtung (45 Grad) wird Interferenzstreifen auf dem Detektorschirm für *a* ergeben, während eine Messung in der negativen Diagonalrichtung (–45 Grad) Anti-Streifen erzeugen wird.

In unserem Labor haben wir demonstriert, dass der Quantenradierer unabhängig von der Reihenfolge funktioniert, in der *a* und *b* nachgewiesen werden. Da unser Detektor für Photon *b* nur 1,5 Meter weit entfernt liegt, ist der Zeitverzug zwischen dem Nachweis von *a* und dem von *b* winzig – nur rund fünf Nanosekunden (milliardstel Sekunden). Aber im Prinzip könnten wir *b* sehr weit fortsenden, etwa bis zum Mars. Das würde dem Beobachter auf dem Mars mehrere Minuten für die Entscheidung geben, ob wir hier unten auf der Erde Streifen beobachten oder nicht. Aber könnten wir unsere Daten nicht bereits gesammelt haben und das Gegenteil beobachten?

Nein, das ist ausgeschlossen. Die verzögerte Messung auf dem Mars verändert kein Ereignis auf der Erde – sie verändert nur unsere Buchführung. Hier folgt die Erklärung in Form eines fiktiven Dialogs. Angenommen, Alice führt auf der Erde einen Doppelspaltversuch mit Viertelwellenplatten durch. Ihr Freund Bob lebt auf dem Mars und sendet ihr von dort ein Paket Photonen. Alice schickt jedes Photon durch den Doppelspalt und misst dann seine Position: »Photon 567 wurde am Ort $x = 4{,}3$ nachgewiesen.« Sie hat keine Ahnung, dass Bob auf dem Mars einen verschränkten Zwilling jedes Photons zurückbehalten hat. Er beschließt, bei jedem Zwilling die Polarisation zu messen, und zwar entweder horizontal und vertikal oder in den diagonalen Richtungen +45 Grad und –45 Grad. Er notiert die Resultate in seinem Laborbuch: »Photon 567(B) wurde mit horizontaler Polarisation nachgewiesen.«

Einige Wochen später besucht Bob seine Freundin Alice.

Alice: Hallo Bob! Wie war's auf dem Mars? Ich habe den Doppelspaltversuch mit Viertelwellenplatten gemacht, wie ihn diese Physiker beschrieben haben. Wie erwartet kam eine langweilige Glockenkurve heraus, ohne eine Spur von Interferenz.

Bob *(schelmisch)***:** Bist du sicher? Nimm noch einmal deine Daten vor und trage nur die Positionen dieser Photonen in ein Diagramm ein. *(Er überreicht Alice eine Liste der Photonen, bei denen er eine Polarisation von +45 Grad gemessen hat.)*

Alice: Interferenzstreifen! Wie hast du die Photonen zur Interferenz gebracht, nachdem sie schon in meinem Laborbuch verzeichnet waren?

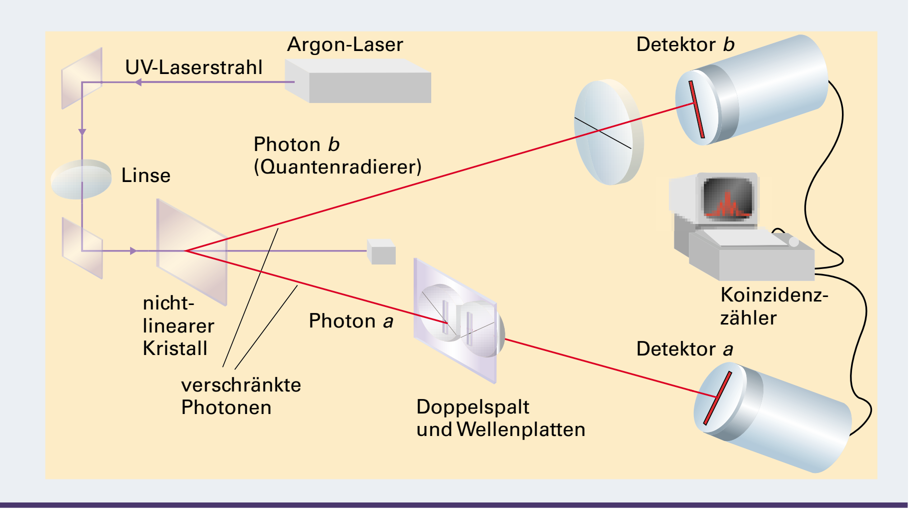
Bob: Das ist noch gar nichts! *(Jetzt gibt er Alice eine Liste der Photonen, an denen er vertikale Polarisation gemessen hat.)*

Alice: Keine Streifen! Jetzt kommt wieder die Glockenkurve heraus. *(Bob gibt ihr eine Liste der Photonen mit –45 Grad Polarisation, und sie trägt deren Positionen in ein Diagramm ein.)* Jetzt ist die Interferenz wieder da, aber diesmal Anti-Streifen. Wie ist das möglich? Du hast Macht über die Vergangenheit!

Bob: Nein, da ist keine Hexerei im Spiel. Die Photonen, die ich dir gab, waren mit Photonen verschränkt, die ich behalten habe. Ich habe an ihnen Polarisati-

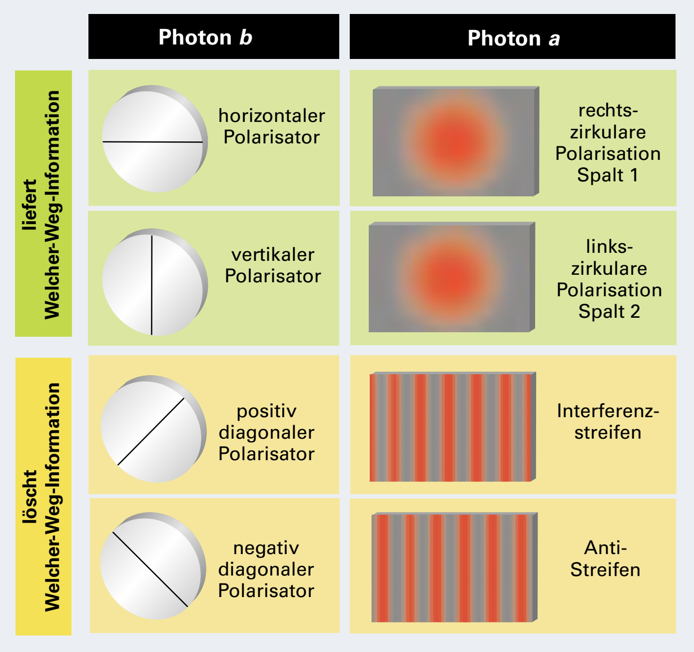
Verzögerte Wahl mit verschränkten Photonen

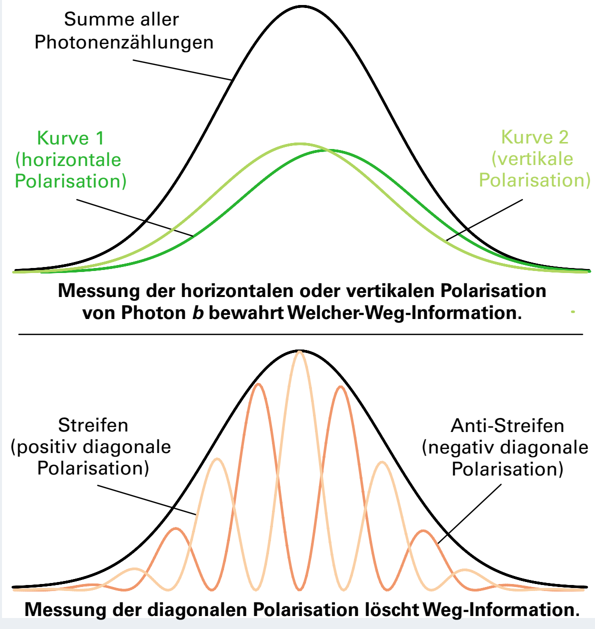
Beim Experiment mit verzögerter Wahl dient ein zweites Photon als Quantenradierer. Zunächst werden zwei verschränkte Photonen *a* und *b* erzeugt, sodass jede Messung der Polarisation von *b* augenblicklich die Polarisation von *a* festlegt. Nachdem Photon *a* den Doppelspalt passiert hat, ist die Polarisation von *b* mit der Welcher-Weg-Information von *a* verschränkt. Mittels Koinzidenzdetektoren vermag der Beobachter festzustellen, welche Photonen miteinander verschränkt sind. Sprechen beide Detektoren innerhalb einer Nanosekunde an, bilden die beiden Photonen fast sicher ein verschränktes Paar.



Doppelte Buchführung gemäß Wellen- oder Teilcheneigenschaften

Das Paradox der verzögerten Wahl beruht nicht auf einer Veränderung der Geschichte, sondern auf einem Wechsel der Buchführung. Zwei verschränkte Photonen *a* und *b* werden von zwei Beobachtern separat aufgezeichnet. Beobachter *A* wiederholt das Experiment viele Male und stellt die Orte, wo die Photonen auftreffen, grafisch dar. Unabhängig von der Art der Messung, die Beobachter *B* wählt, erhält *A* eine Glockenkurve, die einem verwaschenen Lichtfleck entspricht. Wenn Beobachter *B* sich für eine Messung der horizontalen oder vertikalen Polarisation entscheidet, wird jedes seiner *b*-Photonen Welcher-Weg-Information über den verschränkten Zwilling enthalten. Dadurch werden die von *A* gemessenen *a*-Photonen in zwei Gruppen aufgespaltet: Eine ist durch Spalt 1 gegangen, die andere durch Spalt 2. Die Photonenzählung wird für jede dieser Gruppen eine leicht verschobene Glockenkurve ergeben (grüne Linien rechts). Wenn Beobachter *B* sich für eine Messung der diagonalen Polarisation entscheidet, wird die Welcher-Weg-Information gelöscht. In diesem Fall können die verschränkten Photonen, die *A* gemessen hat, in zwei Gruppen getrennt werden: Die eine bildet Interferenzstreifen, die andere Anti-Streifen (unten).





onsmessungen durchgeführt, und daher kommen diese mysteriösen Photonenlisten. Aber meine Messungen haben die Geschichte nicht verändert. Sie haben mir nur gezeigt, wie ich deine experimentellen Resultate aufteilen muss. Ich kann sie entweder in Streifen und Anti-Streifen aufteilen oder in zwei Glockenkurven. Aber den Ort, an dem jedes einzelne Photon tatsächlich gelandet ist, kann ich nicht verändern.

Alice: Eigentlich schade. Aber könnten wir daraus nicht wenigstens eine Methode zum Senden geheimer Botschaften machen?

Bob: Daran arbeitet sicherlich schon jemand.

Vermutlich wäre Einstein nicht glücklich über diese Experimente. Der Quantenradierer verdeutlicht, dass das Komplementaritätsprinzip in der Tat ein fundamentaler Bestandteil der Quantentheorie ist. Obwohl solche Experimente das duale Wesen der Quantenobjekte illustrieren, vermögen die Physiker noch immer nicht zu erklären, warum der Welle-Teilchen-Dualismus existiert. Diesbezüglich sind wir nicht weiter als Richard Feynman, der in den 1960er Jahren schrieb: »Wir können das Rätsel nicht zum Verschwinden bringen, indem wir erklären, wie es funktioniert. Wir werden Ihnen nur sagen, wie es funktioniert.«

Dennoch machen wir Fortschritte. Wir verstehen jetzt, dass für die Komplementarität im Doppelspaltversuch nicht etwa eine durch die Messung verursachte »quantenmechanische Unbestimmtheit« verantwortlich ist, sondern die Quantenverschränkung als notwendiger Teil des Messvorgangs selbst. Das mag auf den ersten Blick aussehen wie ein Nebenaspekt; aber für das – nach all den Jahren noch immer offene – Problem, wie die Quantentheorie zu interpretieren sei, bedeutet es eine wichtige Einsicht. ◁

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE

Stephen P. Walborn beendet gerade seine Dissertation über Quantenoptik an der Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) in Belo Horizonte (Brasilien). **Marcelo O. Terra Cunha** ist dort Assistenz-Professor für Mathematik, **Sebastião Pádua** und **Carlos H. Monken** leiten das Forschungsteam für experimentelle Quantenoptik.

Feynman Vorlesungen über Physik. Drei Bände. Oldenbourg Verlag, München 2001

Komplementarität und Welle-Teilchen-Dualismus. Von Berthold-Georg Englert, Marlan O. Scully und Herbert Walther in: Spektrum der Wissenschaft 02/1995, S. 50

Double-slit quantum eraser. Von S. P. Walborn, M. O. Terra Cunha, S. Pádua und C. H. Monken in: Physical Review A, Bd. 65, 033818 (2002)

Quantum theory: concepts and methods. Von A. Peres. Kluwer Academic, New York 1995

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Nägel und Klammern

Durch Reibung und Spannung

Von Mark Fischetti

Der Nagel als Verbindungselement hat eine jahrtausendealte Tradition (siehe Kasten). Doch erst seit etwa hundert Jahren findet man ihn dank großindustrieller Fertigung in jedem Haushalt. Einst mussten Schmiede jeden Nagel einzeln in Handarbeit herstellen: Aus rot glühendem Eisen zogen sie einen kurzen Stab und hämmerten dann Spitze und Nagelkopf. Ende des 18. Jahrhunderts kamen handbetriebene Vorrichtungen auf, um die Produkte aus Eisenblechen zu schneiden. Um 1880 beschleunigten Dampfmaschinen diesen Vorgang und das »Nägelschneiden« wurde billiger. Doch nicht alle Nägel, die so entstanden, waren gleich haltbar.

»Und David befahl, dass man die Fremden versammeln solle, die im Land Israel waren; und er stellte sie an als Steinhauer, um Quader für den Bau des Hauses Gottes zu behauen. Und David ließ Eisen in Menge für die Nägel zu den Torflügeln bereitstellen und für die Klammern.«

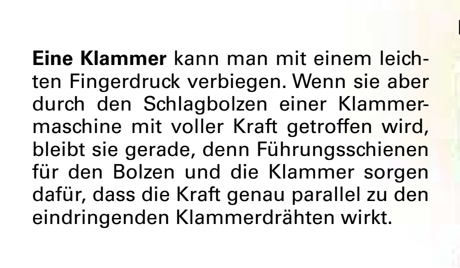
Altes Testament, Das erste Buch der Chronik, Kapitel 22, Vers 2,3

Das änderte sich erst Anfang des 20. Jahrhunderts, als es gelang, Stahl gleichzeitig sowohl biegsam als auch fest zu machen. Nun konnten Maschinen in einem kontinuierlichen Arbeitsgang Nägel aus einer Rolle Stahldraht schneiden und dann Kopf sowie Spitze formen. Das Verfahren erlaubte es auch, die Grundkonstruktion zu variieren, um die Verbindungselemente optimal auf ihren Verwendungszweck abzustimmen. Ein Beispiel dafür sind Klammern – eigentlich nichts anderes als zwei durch einen Querbalken verbundene Nägel.

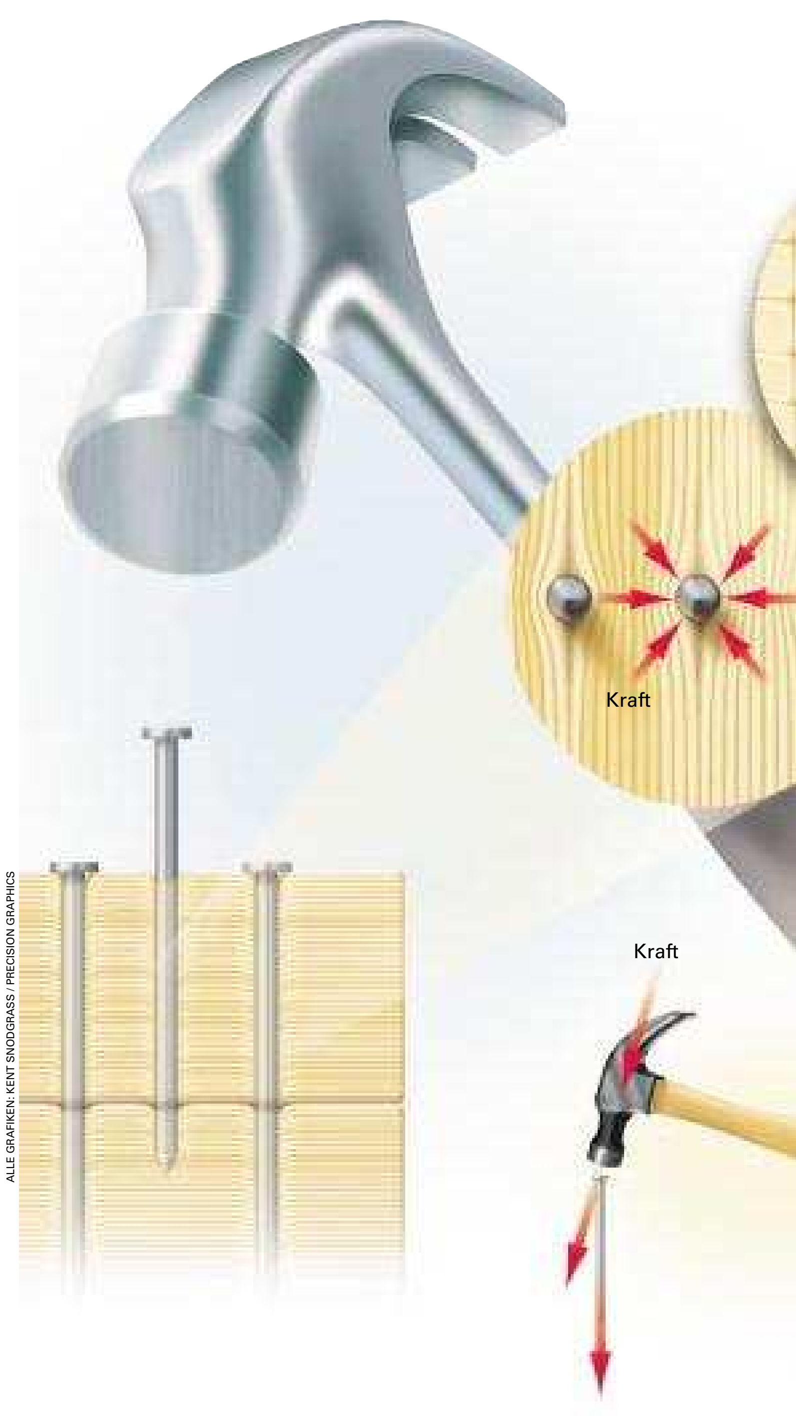
Im Mauerwerk verhindert die Reibung, dass der Nagel wieder herausrutscht. Im Holz kommt außerdem die Spannung in den Holzfasern dazu, die den Nagelschaft zum Beispiel in einem Brett festhält, selbst wenn Schwingungen oder Änderungen in Temperatur und Luftfeuchtigkeit die Holzfasern zusammenziehen oder weiten. Durch Anrauen des Schafts, Ringe und Widerhaken lässt sich die Haltekraft noch steigern. Manche Hersteller bieten auch Beschichtungen an, um die Reibung zu vergrößern, doch die Wirksamkeit dieser kostspieligen Maßnahme ist bislang kaum erforscht.

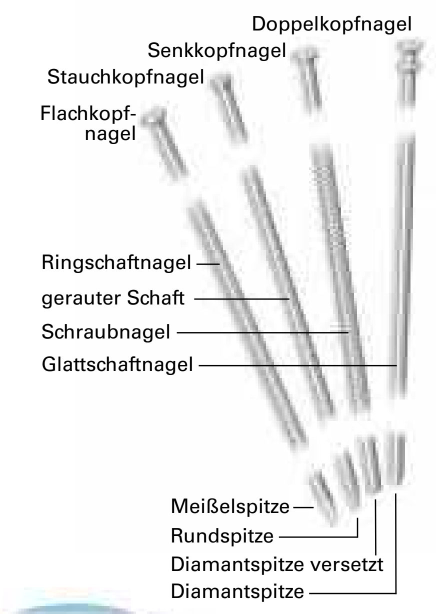
Anfang des 17. Jahrhunderts rühmte der englische Dichter George Herbert (1593 – 1633) in seinem Werk »Jacula Prudentum«: »Fehlt ein Nagel, geht das [Huf]Eisen verloren, fehlt das Eisen, geht das Pferd verloren, geht das Pferd verloren, dann auch der Reiter.« ◁

Mark Fischetti ist Mitarbeiter von Scientific American. Die Redaktion dankt Reinhard Günther von der Firma Drakena in Weißenfels für fachliche Unterstützung.



Eine Klammer kann man mit einem leichten Fingerdruck verbiegen. Wenn sie aber durch den Schlagbolzen einer Klammermaschine mit voller Kraft getroffen wird, bleibt sie gerade, denn Führungsschienen für den Bolzen und die Klammer sorgen dafür, dass die Kraft genau parallel zu den eindringenden Klammerdrähten wirkt.

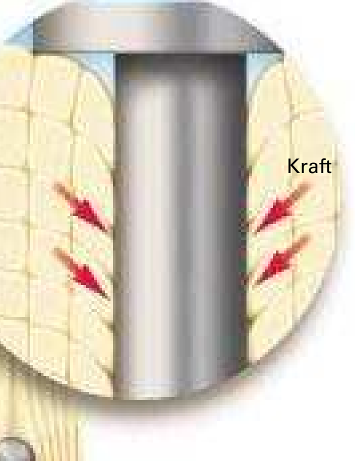




Flache Köpfe machen das Hämmern leichter und geben zusätzlichen Halt; Stauch- und Senkköpfe können mit in das Holz eingeschlagen und dann überzogen werden, was schöner aussieht. Gerüste oder demontierbare Verschalungen werden mit Doppelkopfnägeln festgemacht: Am zweiten Kopf lässt sich ein solcher Nagel leicht herausziehen.

Aufgeraute Schafte und solche mit Ringen oder Gewinden lösen sich weniger leicht als glatte, denn wenn sich diese verformen, verhaken sie sich mechanisch in den Holzfasern.

Ein sehr spitzer Nagel spreizt die Holzfasern, ohne sie zu zerreißen; entsprechend viele Fasern halten ihn dann gut fest. Doch beim Einschlagen kann das Holzstück auch gespalten werden. Stumpfe Nägel zerreißen Fasern. Dadurch splittert das Holz nicht so leicht, aber die Haltekraft des Nagels ist auch geringer. Spitzen, die wie eine Pyramide (Diamantspitzen) geformt sind, bieten einen Kompromiss.



Die Spitze des Nagels verformt Holzzellen in Richtung des eindringenden Schafts. Um ihn wieder zu entfernen, müssen diese Zellen in die entgegengesetzte Richtung aufgebrochen werden. Ein längerer oder dickerer Nagel hat eine größere Oberfläche als ein dünner oder kurzer und leistet damit mehr Widerstand, wenn man ihn herausziehen möchte.

Ein Nagel spreizt das Holz an der Eintrittsstelle und presst so die umliegenden Fasern zusammen. Diese drücken daher gegen den Nagelschaft und halten ihn damit erstaunlich stark fest, und zwar umso mehr, je länger und dicker der Nagel ist.

Es gäbe keine krummen Nägel, wenn der »Bediener« den Hammer stets parallel zum Nagelschaft führen würde. Aber es genügen einige Grad Abweichung von dieser Ideallinie und eine seitwärts gerichtete Kraft entsteht, die den Nagel verbiegt. Schnellnagler und Nagelmaschinen haben deshalb Führungen für ihren Schlagbolzen.

WUSSTEN SIE SCHON?

▶ **Die Reibung als Grundlage** der Haltekraft nutzten auch schon Handwerker im mesopotamischen Uruk (heute das irakische Warka) im 3. Jahrtausend v. Chr. Sie drückten bis zu 15 Zentimeter lange farbige Tonstifte in geometrischen Mustern in den Lehm von Tempelfassaden. Diese Mosaike dienten nicht nur dem Schmuck, sondern festigten auch die Wandkonstruktion. Rein funktionale Nägel aus Kupfer wurden ebenfalls bereits in Uruk verwendet. Sie dienten häufig dem Befestigen von Metallbeschlägen auf Holz, etwa bei Möbeln.

▶ Bisher ist **Stahl** der wichtigste Werkstoff für Nägel, doch werden immer öfter auch solche aus Aluminium oder Aluminiumlegierungen eingesetzt. Sie sind leichter und es besteht in der Regel keine Korrosionsgefahr. Aluminium ist zum Beispiel resistent gegen ammoniak-, schwefelwasserstoff-, salpetersäure- und essigsäurehaltige Verbindungen. Sein wichtigstes Einsatzgebiet liegt deshalb in der chemotechnischen Industrie.

▶ **In Europa** gibt es verschiedene Normen für Nägel. In ihnen sind unter anderem die Mindestzugfestigkeit, die Stahlzusammensetzung und die Toleranzen für die Abmessungen aufgelistet. Letzteres ist besonders wichtig für handbetriebene oder stationäre Nagelmaschinen, damit in ihnen Nägel unterschiedlicher Hersteller verwendet werden können. Die Einhaltung der Normen überwachen Institute für Bautechnik, etwa in Karlsruhe. Weniger streng sind die Normen für den Heimwerkernagel. So kann der Hersteller wählen, wie hart der Stahl ist, den er nimmt, was sich dann natürlich auf den Preis auswirkt.

▶ **In der Möbel- und Palettenindustrie** werden Nägel mit Antispaltspitzen verwendet. Sie sind relativ stumpf, das Holz splittert also nicht so leicht. Ist die Spitze einseitig geformt, verbiegt sich der Nagel in eine gewünschte Richtung, sobald er auf eine gegendrückende Metallplatte trifft.

▶ Hat ein Nagel ein **Gewinde** mit geringer Steigung (sowie einen Kopf mit Kreuzschlitz), lässt er sich einschlagen und kann später mit einem Schraubenzieher leichter wieder gelöst werden. Bei großer Steigung des Gewindes dreht sich ein solcher Nagel beim Einschlagen wie eine Schraube ins Holz.

BEIDE FOTOS: RANDY OLSON (AURORA PHOTOS) / MINISTERIUM FÜR ARCHÄOLOGIE UND MUSEEN, PAKISTAN

Der »Priesterkönig« stellt vermutlich ein Mitglied jener Elite dar, die in der frühen Hochkultur am Indus herrschte. Schmuck wie Ketten aus verschiedenfarbigen Steinperlen (rechts) war in dieser Zivilisation auch Zeichen von Reichtum, hoher sozialer Stellung und Macht (die abgebildete Kette stammt aus Mohenjo-Daro).

Harappa – Stadt der Händler

Als die Herrscher in Ägypten und Mesopotamien durch gewaltsame Eroberungen große Reiche schufen, entwickelte sich im Industal eine Hochkultur – allein durch eine florierende Wirtschaft.

Von Jonathan Mark Kenoyer

Jene alte Siedlungsstätte fast 200 Kilometer südwestlich von Lahore, die wir Archäologen Harappa nennen, bietet seinen Besuchern alljährlich ein herrliches Spektakel: die Frühlingsmärkte. Aus Gehöften und Dörfern streben die Menschen in die größeren Städte. Musikanten, Gaukler und Artisten unterhalten die Menge, während umherziehende Kaufleute ihre Waren feilbieten. Junge Frauen überreichen islamischen Pilgern Weihegaben nebst einem Obolus, damit sie den Sufi-Heiligen Sakhi Sarwar im Namen der Spenderinnen um gesunde Kinder bitten, insbesondere um Söhne.

Das Spektakel dauert an einem Ort immer nur einen Tag. Abends macht sich das bunte Volk, traditionellen Routen folgend, zu Fuß oder mit Eselskarren auf zur nächsten Station. Schließlich vereinigen sich Trüppchen von Pilgern in dem hügeligen Gelände Belutschistans zu ganzen Scharen, die von allen Seiten her einer Art Wallfahrtsort bei Dera Ghazi Khan, rund hundert Kilometer westlich der Industriestadt Multan, zustreben: Dort wurde im 12. Jahrhundert Hazrat Syed Ahmed Sultan begraben, den das Volk von jeher Sakhi Sarwar – den großzügigen König – nennt; und dort legen die Pilger die mitgebrachten Opfer der Frauen samt ihren Bittgebeten nieder. Dann nehmen sie gesegnetes Salz und geweihte Erde vom umfriedeten Bezirk des Mausoleums, um es im kommenden Jahr den glücklichen Müttern und ihren Neugeborenen zu überreichen, als Zeichen, dass der Heilige ihnen wohl gesonnen sei.

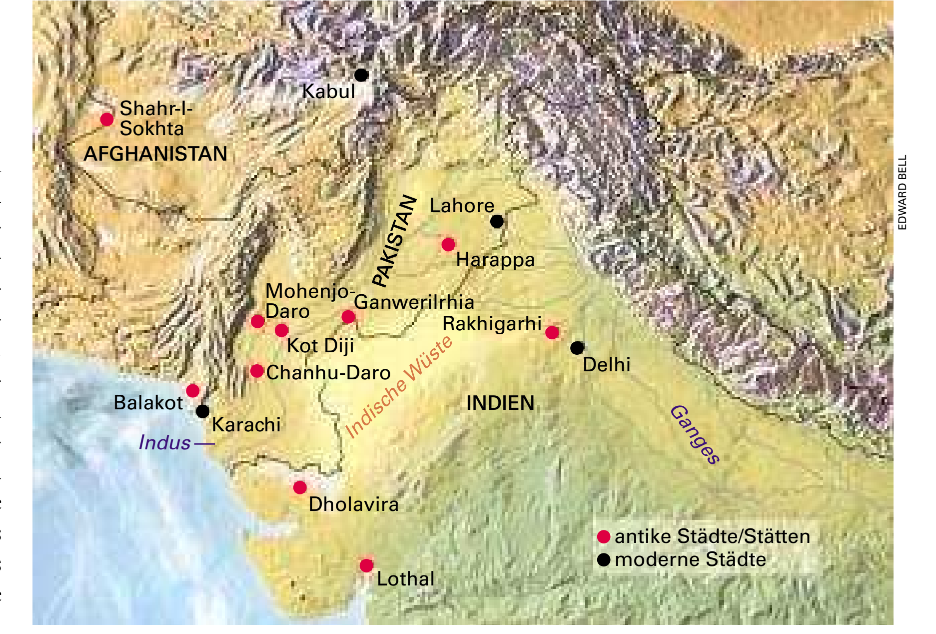
Lange betrachteten wir diese Veranstaltungen als netten Lokalkolorit, bis wir Suchgräben innerhalb des ehemaligen südlichen Tores von Harappa anlegten. Der heutige Marktplatz grenzt direkt an diesen Bereich, sodass es wenig verwunderte, in der obersten Bodenschicht Scherben von moderner Keramik und gläsernen Armreifen zu finden, außerdem aktuelle Münzen und Bleikügelchen, die offenkundig in Schießbuden aus Luftgewehren verfeuert worden waren, sowie Bruchstücke von Blech- und Plastikspielzeug.

Doch darunter kamen Artefakte des prähistorischen Harappa zum Vorschein, die dem neuzeitlichen Müll verblüffend glichen: Scherben von Gefäßen und Schmuckreifen aus unglasiertem gebranntem Ton, Murmeln, Bruchstücke von Spielzeugwägelchen, Fragmente von Statuetten sowie einige Gewichte und mit Zeichen versehene Täfelchen, die wahrscheinlich beim Verkauf und Verzollen von Waren am Eingang zur Stadt gebraucht worden waren.

Diese Relikte legen den Schluss nahe, dass an jener Stelle schon vor etwa 4000 Jahren auf ähnliche Weise wie heu- ▷

▷ te gehökert und gespielt wurde. Auch damals dürfte die Landbevölkerung an Markt- und Festtagen in das große Gemeinwesen gekommen sein, um an Zeremonien teilzunehmen, die Verbindungen zu Verwandten und zur Sippe zu erneuern und handwerkliche Produkte, Schmuck oder Lebensmittel einzutauschen. Auf denselben Wegen, die nun die Sufi-Pilger ziehen, und auf den Wasserläufen der Flussniederung brachten sie landwirtschaftliche Erzeugnisse in die Stadt, ebenso die Rohmaterialien, aus denen in den Werkstätten Harappas Luxusgegenstände für die ansässige Elite und für den Fernhandel entstanden.

Eine solche Kontinuität über die Zeiten hinweg muss uns Menschen einer schnelllebigen Zeit erstaunen. Beruht sie auf einer kulturell bedingten Wahl oder einfach darauf, dass sich die verfügbaren Ressourcen und Technologien seither kaum geändert haben?



▲ **Die Induszivilisation entstand vor etwa 5300 Jahren. Zu ihrer Blütezeit nahm sie im heutigen Pakistan und westlichen Indien ein Gebiet von der Größe Westeuropas ein und umfasste mehr als 1500 Siedlungen und Städte.**

Ein Reich von der Fläche Westeuropas

Harappa war eine Metropole der so genannten Induskultur, einer der ersten urbanen Kulturen der Alten Welt. Wie Mesopotamien an Euphrat und Tigris, Ägypten am Nil sowie die Yangshao- und die Longshankultur Chinas am Gelben Fluss entstand sie an einem bedeutenden Stromsystem: Der Indus ist mit rund 3200 Kilometern der längste Fluss des Subkontinents. Leider ist es bislang nicht gelungen, die auf Siegeln, Amuletten und Gefäßen angebrachten, teils bildhaften, meist aber abstrakt wirkenden Schriftzeichen zu entziffern; es ist nicht einmal sicher, welche Sprachfamilie sie repräsentieren. Wie die Gesellschaft organisiert war und worauf die politische, wirtschaftliche, militärische und ideologische Macht beruhte, erschließt sich deshalb vor allem aus den archäologischen Funden. Die augenfälligste Leistung dieser Kultur ist sicher ihre Bautechnik und Stadtplanung, soweit wir sie aus den freigelegten Arealen der großen Städte und kleinen Siedlungen erschließen können.

Als erster Europäer war vermutlich der britische Abenteurer Charles Masson (1800–1853) auf die Ruinen von Harappa gestoßen. Wenige Jahre später ließen britische Ingenieure von dem Ruinenfeld Unmengen von Ziegeln als Packmaterial für die 160 Kilometer lange Eisenbahntrasse zwischen Multan und Lahore holen. Sir Alexander Cunningham (1814–1893), ein englischer Offizier, später der erste Direktor des Indischen Archäologischen Dienstes, schrieb 1875: »Ich führte verschiedene Grabungen in Harappa durch, aber die gesamte Oberfläche war so vollständig von den Eisenbahnbauern geplündert worden, dass ich wenig Erhaltenswertes vorfand.«

Ab den 1920er Jahren erfolgten dort und im gut 600 Kilometer weiter südwestlich gelegenen Mohenjo-Daro intensivere Grabungen durch indische und pakistanische Kollegen. Niemand hatte damit gerechnet, in der fruchtbaren Ebene des Indus eine herausragende alte Kultur zu entdecken. Surveys und Grabungen haben bis heute mehr als 1500 Siedlungen jener Zeit in einem Gebiet von der Fläche Westeuropas zu Tage gebracht – diese Zivilisation nutzte ein Gebiet, das doppelt so groß wie Mesopotamien oder das pharaonische Ägypten war.

Zwar bauten jene Menschen keine imposanten Tempel und Paläste. Anders als die Herrscher Ägyptens und der mesopotamischen Stadtstaaten bestatteten sie ihre Toten ohne reiche Beigaben. Sie stellten vermutlich auch keine Heere auf und unternahmen keine Eroberungen. Doch sie exportierten Luxusgüter an den Persischen Golf, nach Mesopotamien und nach Zentralasien. Ihre Städte waren planmäßig erbaut, durchzogen von Kanalnetzen zur Wasserversorgung und Entwässerung. Großräumige Häuser dienten als Wohnungen und Werkstätten. Das Baumaterial waren sonnengetrocknete und gebrannte Ziegel handlichen Formats von noch heute gebräuchlicher Größe; das lässt auf eine rationalisierte und mithin ökonomische Bauweise schließen. Die Gleichartigkeit in den Mustern der Stadtanlagen und im Stil der handwerklichen Produkte zeigt an, dass sich bestimmte wirtschaftliche und soziale Strukturen im gesamten Kulturbereich durchsetzten und hielten.

Dieses Wissen ist bereits die Frucht jahrzehntelanger Forschung: George F. Dales von der Universität von Kalifornien in Berkeley gründete 1986 das Harappa Archaeological Research Project, ein langfristig angelegtes Forschungsvorhaben. Derzeit leiten es Richard H. Meadow von der Harvard-Universität in Cambridge (Massachusetts), Rita Wright von der New-York-Universität und ich in Kooperation mit dem pakistanischen Ministerium für Archäologie und Museen. Wir führten sowohl Untersuchungen vor Ort als auch Laboranalysen durch, um die ursprüngliche Besiedlung von Harappa und ihr Anwachsen zur Metropole zu erforschen.

Harappa wird Zentrum

Die wirtschaftlichen Grundlagen der frühen Städte am Indus waren Ackerbau und Viehzucht, ergänzt um Fischfang und Jagd. Zusätzliche Einkünfte erzielten sowohl die einfachen Leute als auch die soziale Oberschicht aus der Herstellung und dem Verkauf von Gütern wie Baumwoll- und Wollstoffen sowie anderen handwerklichen Erzeugnissen.

Die früheste dörfliche Siedlung von Harappa lag an einem früheren Lauf des Flusses Ravi; diese Phase der Induskultur

ist nach ihm benannt. Das Gemeinwesen entstand vor 3300 v. Chr. und existierte rund fünf Jahrhunderte. Im 4. Jahrtausend v. Chr. errichteten die Sumerer im südlichen Mesopotamien die Stadt Uruk (heute Warka), die um 3000 v. Chr. ihre erste Blüte erlebte. Mit der politischen Einigung Ägyptens unter einem Herrscher begann dort 2920 v. Chr. die Zeit der Dynastien.

Das Urstromtal des Indus war für die landwirtschaftliche Nutzung hervorragend geeignet. Die Menschen, die als Erste in Harappa sesshaft wurden, züchteten Rinder und bauten Weizen und Gerste, Gemüse und Sesam an. Arbeitsteilung ermöglichte die Ausbildung handwerklicher Fertigkeiten. Die Verbreitung von Tauschgütern entlang der ersten Netze von Handelswegen sorgte für eine Vereinheitlichung der religiösen Vorstellungen und Symbole, der Konstruktion von Gebäuden, Werkzeugen und handwerklichen Produkten.

Perlen und Reife wurden in Harappa hergestellt, aus Terrakotta für einfache Leute und Kinder, aus exotischen Steinen und Muschelschalen für Wohlhabende. Manche der wertvolleren Materialien stammten von 300 oder gar 800 Kilometer entfernten Vorkommen. Abdrücke von Geweben auf Tonperlen lassen vermuten, dass auch Wolle und Baumwolle verarbeitet wurden.

Schon diese früheste Kultur ritzte Symbole in Tonwaren. Manche davon sind aktuellen Untersuchungen zufolge in die spätere Indusschrift eingegangen, vergleichbar manchen alten Zeichen aus Mesopotamien und Ägypten, die ihren Weg in die Hieroglyphen beziehungsweise die Keilschrift gefunden haben.

Von den vielen Dörfern, die an dem vielfach verzweigten Stromsystem im heutigen Pandschab entstanden, wuchs einzig Harappa zu städtischer Größe heran. Zwischen 2800 und 2600 v. Chr. entwickelte sich der Ort zu einem florierenden wirtschaftlichen Zentrum der Region. Nach dem Leitfundort, einem Mitte der 1950er Jahre erstmals untersuchten kleinen Siedlungshügel rund vierzig Kilometer östlich von Mohenjo-Daro auf der linken Seite des Indus, wird die Periode Kot-Diji genannt. In dieser Zeit dehnte sich Harappa über mehr als 25 Hektar aus und gewann mit zwei ummauerten Sektoren städtisches Gepräge. Die Handwerker entwickelten neue Techniken, mit denen sie weithin absetzbare Waren produzieren konnten. Insbesondere verstanden es die Töpfer nun, grau gebrannte Schmuckreifen und deckend glasiertes Geschirr zu fertigen, also Keramik, die hohe Ofentemperaturen erforderte.

Auch der Import gewann an Bedeutung: Bruchsteine, die weder am Indus noch an seinen Nebenflüssen zu finden waren, und andere Rohmaterialien wurden in wachsenden Mengen nach Harappa geschafft. Die Transportmittel waren wahrscheinlich Ochsenkarren und Boote mit flachem Boden, wie sie später nachweislich in Gebrauch waren. Aus der Zeit selbst ist aufschlussreiches Spielzeug erhalten: Wägelchen und einzelne Rädchen aus Terrakotta. Außer kleinen Nachbildungen von Tieren wurden auch menschliche Figurinen gefunden, die bemalt waren, als trügen sie Gewänder aus gewebten Stoffen – ein weiterer Hinweis auf die Textilproduktion, aber auch ein Hinweis darauf, dass der Kleidung neben funktionaler auch repräsentative Bedeutung beigemessen wurde.

Die ersten Schriftzeichen

Überdies entstand in der Kot-Diji-Phase die frühe Indusschrift. Zeichen dieses Systems finden sich auf zahlreichen Keramikscherben sowie insbesondere auf Siegeln und deren Abdrücken. Offenbar begannen damals Kaufleute, ihr Eigentum zu kennzeichnen, indem sie an den Türen von Speicherräumen und auf der Verschnürung von Handelsgütern einen Tonbatzen als Plombe anbrachten und stempelten (siehe Bild). Die vielfach aus Speckstein gefertigten Siegel sind meist annähernd quadratisch. Außer den tief eingravierten linearen Schriftzeichen tragen sie Reliefs mit geometrischen Mustern oder figürlichen Motiven. Bei den stilisierten Tieren handelt es sich um Stiere, die fast immer mit nur einem Horn dargestellt sind, um Zebus und Wasserbüffel, aber auch um Elefanten und Nashörner. Da verhältnismäßig wenige Siegel gefunden wurden, dürften sie ▷

Siegel mit eingravierten Darstellungen von Tieren wie diesem einhörnigen Stier sowie bisher nicht entzifferten Schrift- und Zahlzeichen bezeichneten vermutlich Eigentümer und Güter. Wahrscheinlich plombierten Kaufleute Waren und Lager mit Tonklumpen, die sie stempelten. Der getrocknete harte Ton sicherte so die Güter gegen Diebstahl.

RANDY OLSON (AURORA PHOTOS) / HARAPPA ARCHAEOLOGICAL RESEARCH PROJECT, MINISTERIUM FÜR ARCHÄOLOGIE UND MUSEEN, PAKISTAN

▷ Individuen oder Gruppen mit beträchtlicher Machtfülle wie Landeigentümern, Handelsherren und religiösen Führern vorbehalten gewesen sein.

Ein auf den ersten Blick unscheinbarer Einzelfund zeugt von der Wirtschaftschaftskraft während der Kot-Diji-Periode: ein Gewicht aus Kalkstein. Der kleine Kubus wiegt 1,13 Gramm, was exakt in das später standardisierte Gewichtssystem der Induszivilisation passt. In Harappa war somit die methodische Wertbestimmung kostbarer Substanzen und Erzeugnisse als Grundlage etwa für Zölle, Steuern oder Tribute rund zwei Jahrhunderte früher als in den anderen Städten üblich.

Meister des Im- und Exports

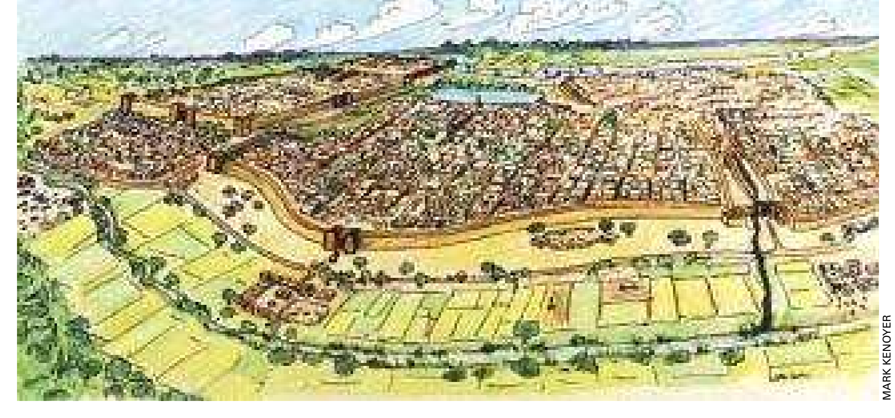
Bereits in der vorangegangenen Ravi-Periode wurde Keramik in Harappa auch mit gehörnten menschlichen Gestalten und offenbar rituellen Szenen dekoriert. Solche Muster finden Archäologen aber auch in weit entfernten Siedlungen. Der Schluss liegt nahe: Gestützt auf ihre reichen landwirtschaftlichen Ressourcen entwickelten die Bewohner ökonomische und politische Kraft. Die religiösen Praktiken mögen der ideellen Legitimierung ihrer herausragenden Rolle in der Region gedient haben.

Während ägyptische und mesopotamische Herrscher neue Gebiete stets militärisch vereinnahmt haben, wuchs die anfangs dörfliche Siedlung am Indus auf friedliche Weise zu einer mächtigen Metropole. Bis heute fehlen die sonst typischen Funde: Waffenlager, Anzeichen für bewaffnete Konflikte wie entsprechend zugerichtete Skelette oder Brandschichten. Auch bildliche Darstellungen von Kriegern wurden nicht entdeckt und anders als in den westlich gelegenen Hochkulturen ließen sich die Herrscher nicht als siegreiche Kriegsherren abbilden.

Die Blütezeit, Harappa-Phase genannt, begann um 2600 v. Chr. Von da an blieb die nunmehr voll entwickelte Stadt für nicht weniger als sieben Jahrhunderte lang eines der größten und ökonomisch wie politisch einflussreichsten Zentren des Industals – und das, obwohl sie nie über eine Armee verfügte.

Je nach Jahreszeit lebten 40 000 bis 80 000 Menschen in der Metropole. Denn wenn im Frühling und im Spätsommer Marktsaison war, kamen Hunderte von reisenden Händlern und Tausende von Besuchern aus dem Umland. Der Reichtum der Kaufleute und der Wettbewerb der Unternehmer stimulierten die Erfindung neuer handwerklicher Techniken und den Ausbau wirtschaftlicher Beziehungen.

In allen Siedlungen am Indus und an seinen Nebenflüssen entdeckten die Archäologen in den Fundschichten jener Phase die auf typische Weise mit rituellen Motiven bemalte Keramik, außerdem Objekte wie würfelförmige steinerne Gewichte und Siegel mit dem einhörnigen Stier oder anderen Tieren. Der ökonomische Austausch reichte nun bis in die Bergregionen Afghanistans und Zentralasiens, denn von dort wurden Lapislazuli sowie Zinn, Gold und Silber importiert, vielleicht auch hochwertige Wolle; Ausfuhrgüter waren Getreide und Vieh, außerdem Baumwolle und eventuell sogar Seide. Allerdings gibt es für den Handel mit pflanzlichen und tierischen Fasern, da sie sich nicht erhalten haben, keinen Beleg. Ebenfalls in Zentralasien und noch in Mesopotamien fanden sich längliche elegante Perlen aus Karneol und Armreifen aus Muschelschalen, die für die Induszivilisation jener Zeit charakteristisch sind. Auch wenn die eingangs erwähnten Funde am südlichen Tor von Harappa dafür natürlich keinen Beweis darstellen, stelle ich mir gern vor, dass auch damals fahrende Händler und Pilger zu bestimmten Jahreszeiten von Markt zu Markt zogen, wie sie es noch heute pflegen.

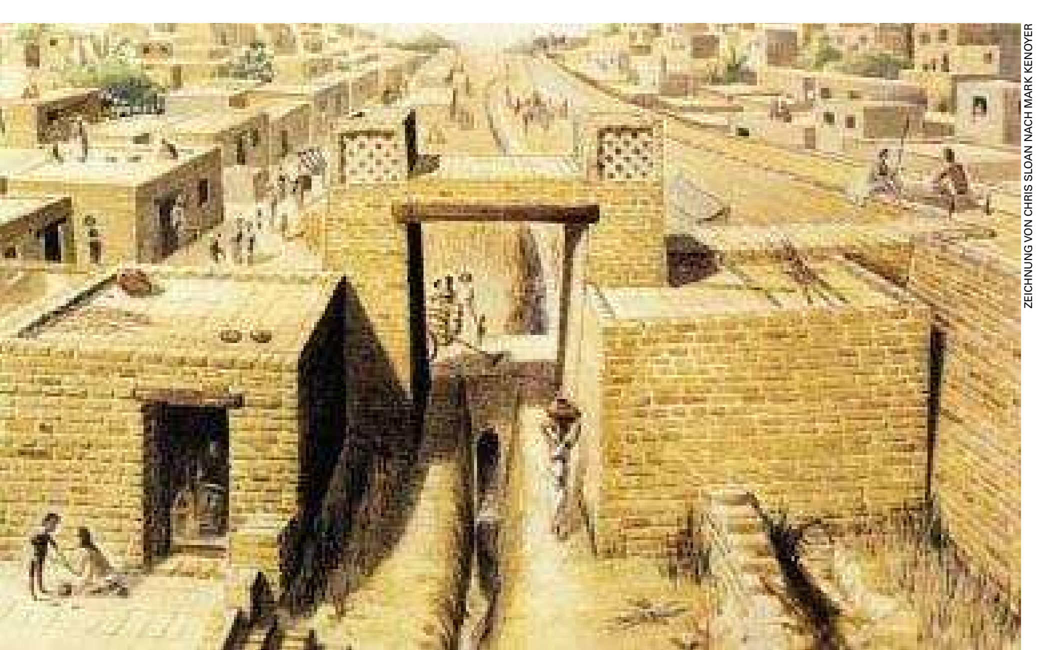


MARK KENOYER

▲ **Mauern umgaben nicht nur Harappa selbst, sondern auch verschiedene Stadtbezirke, um Bereiche für die herrschende Elite abzugrenzen.**

Einfache Zugangskontrollen

In seiner Glanzzeit bedeckte Harappa mehr als 150 Hektar. Die gleichnamige moderne Siedlung mit etwa 20 000 Einwohnern nimmt ungefähr ein Drittel des in prähistorischer Zeit bebauten Areals ein. Innerhalb der ehemals gut fünf Kilometer langen Umgrenzung liegen drei Erhebungen von mehreren Metern Höhe (siehe Zeichnung oben). Jede war von einer starken Mauer aus Lehmziegeln umschlossen, schmale Tore waren nur von einem Karren zur gleichen Zeit passierbar (siehe linkes Bild). Offenbar genügten Wächter, um die Zugänge durch die Mauern zu kontrollieren – hätte die ▷



ZEICHNUNG VON CHRIS SLOAN NACH MARK KENOYER

◀ **Die Zugänge durch die Mauern waren so schmal, dass immer nur ein Karren gleichzeitig hindurchpasste. In diesem Durchgang verliefen auch Abwasserrinnen.**

Stadt der Perlen

Bei den Ausgrabungen in Harappa entdeckten wir in allen Schichten der einzelnen Kulturphasen steinerne Perlen. Ihnen maß man offenbar erhebliche Bedeutung bei: Wir fanden auch kleine Figurinen, die üppig mit Schmuck behängte Menschen darstellen. Demnach trugen zumindest manche Bewohner der Stadt mehrere Ketten, deren Perlen aus farbigen und gemusterten Steinen hergestellt waren. Einige Werkstätten wurden vermutlich von der städtischen Elite unterhalten; dort entstanden außergewöhnliche Perlen, die Reichtum, Status und Macht symbolisierten.

Überreste der Betriebe und Werkstücke in verschiedenen Stadien der Bearbeitung lassen erkennen, wie sich die Schleif-, Bohr- und Poliertechniken im Laufe von 1400 Jahren entwickelt haben. Desgleichen dokumentieren die Funde auch den Wandel der Stile, den sicherlich der Wettbewerb der Produzenten, Käufervorlieben und das Verlangen Wohlhabender nach immer wert- und reizvollerem Zierrat angeregt haben.

Das gilt schon für die Ravi-Periode (3300 – 2800 v. Chr.). Klobige Steinperlen zu machen ist relativ leicht, doch die im Fundgut dominierenden Exemplare von 1,5 bis 3 Millimeter Dicke und 1 bis 2 Millimeter Länge erfordern Bohrungen zum Auffädeln auf eine Schnur mit Durchmessern von 0,5 bis allenfalls 0,75 Millimetern.

Von frühester Besiedlung an bis zum Ende der Harappa-Kultur um 1300 v. Chr. wurde als Rohmaterial zumeist Speckstein (fachlich Steatit) verwendet. Er ließ sich leicht mit Kupferbohrern oder sogar mit Akaziendornen durchlöchern. Danach wurden die Rohlinge auf die richtige Größe geschliffen und poliert. Erhitzen im Brennofen über 850 Grad Celsius härtete die Perlen und färbte sie weiß. Mitunter ließen die Handwerker die Oberfläche rau und überzogen sie mit einer Glasurmasse aus fein gemahlenem Quarzsand und Kupferoxid, die beim Brennen einen blaugrün glänzenden Überzug ergab.

Von der Ravi-Periode an verwendete man auch härtere Steine, vor allem Chalcedon – eine Abart von Quarz – in den besonders farbigen Varietäten Achat und Jaspis. Doch darin Bohrungen einzubringen ist schwieriger, denn die verfügbaren Werkzeuge waren von vergleichbarer Härte. Zunächst musste eine Vertiefung mit einem Stein- oder Kupferwerkzeug eingebracht werden, danach wurde ein Steinzylinder über eine Bogensehne gedreht, bis er die Perle halb durchdrungen hatte. Danach erfolgte der gleiche Prozess von der anderen Seite.

Um 2600 v. Chr. entdeckten die Kunsthandwerker eine Steinart, die als Bohrer wesentlich effektiver eingesetzt werden konnte. Wir haben sie deshalb zu Ehren des amerikanischen Archäologen Ernest John Henry Mackay, der in den 1920er und 1930er Jahren umfangreiche Ausgrabungen am Indus leitete und die ersten Exemplare derartiger Bohrer in Chanhu-Daro fand, als Ernestit bezeichnet.

Dieses feinkörnige Gestein besteht vor allem aus Quarz, Sillimanit, Mullit, Hämatit und Titanoxid. Das Mullit genannte Aluminiumsilikat ist in der Natur äußerst selten, aber der wichtigste Bestandteil von weißer Keramik, Porzellan und ähnlichen bei hohen Temperaturen gebrannten modernen Materialien. Sein Vorkommen in den prähistorischen Perlbohrern zeigt an, dass das ursprüngliche Gestein absichtlich erhitzt wurde, was ja auch zum Härten des Steatits üblich war.

DAVID NEVALA / HARAPPA ARCHAEOLOGICAL RESEARCH PROJECT, MINISTERIUM FÜR ARCHÄOLOGIE UND MUSEEN, PAKISTAN

▲ **Meisterhafte Handwerker der frühen urbanen Zentren am Indus entwickelten raffinierte Bohr- und Schleiftechniken, um aus farbigen, vielfach aus großer Ferne herangeschafften Steinen kunstvolle Perlen zu fertigen.**

Mit derartigem Werkzeug, das anscheinend nur im Industal verwendet wurde, ließen sich gediegene längliche Perlen aus Karneol, einer weiteren Quarzart, fertigen. Sie wurden bevorzugt von der heimischen Oberschicht getragen, aber auch bis nach Zentralasien und Mesopotamien – zum Beispiel nach Ur – exportiert. Besonders wertvoll waren Ketten aus mehreren Strängen solcher Perlen mit Abstandshaltern aus polierter Bronze (Bild Seite 43).

In den Kulturschichten der Zeit nach 1900 v. Chr. ist Ernestit nicht mehr zu finden. Wahrscheinlich blieb das Rohmaterial aus, weil damals der Fernhandel zum Erliegen kam. Die Perlenmacher wussten sich aber zu helfen. Sie miniaturisierten die seit langem bewährte Kernbohrtechnik, das Verfahren, mit Hohlzylindern steinerne Ringe herzustellen oder Stücke von Alabaster zu Gefäßen auszuhöhlen: Mit Kupferröhrchen und einem schmirgelnden Pulver gelangen ihnen Bohrungen von nur einem Millimeter Durchmesser.

Stadt größeren Angriffen standhalten müssen, wären sicher militärische Einheiten zur Verteidigung aufgebaut worden.

Luxuriöse Wasserversorgung

Das Straßennetz verband die verschiedenen Stadtteile, schied aber auch öffentliche Bereiche und Wohnviertel voneinander. Mehrstöckige Gebäude aus gebrannten Ziegeln standen an nord-südlich und ost-westlich ausgerichteten, bis zu mehr als acht Meter breiten Achsen. Einige dieser Straßen hatten sogar einen Mittelstreifen; womöglich war also für den Verkehr in einer Richtung jeweils eine andere Straßenseite vorgesehen.

Trinkwasserbrunnen versorgten die Bevölkerung innerhalb und außerhalb der Stadtmauern. Wohnhäuser hatten einen Badebereich, Latrinen und einen Abflusskanal. Sammelleitungen führten die Abwässer auf Äcker, die mit den Fäkalien gedüngt wurden. Keine andere Stadt der Alten Welt verfügte über ein solch ausgefeiltes Wasser- und Abwassersystem. Selbst im Römischen Imperium, zwei Jahrtausende später, gab es solchen Luxus nur für Wohnviertel der oberen Gesellschaftsschicht.

In der Harappa-Phase gelangte offenbar auch die Schrift der Induszivilisation zur Reife. Die Elite bediente sich der mehr als 400 Zeichen vermutlich zur Kontrolle der Wirtschaft und im Rahmen der Politik – noch ist diese Schrift ein Rätsel. Die Gelehrten hoffen immer noch auf ein mehrsprachiges Dokument, um den Kode zu knacken, wie es dem Engländer Thomas Young und dem Franzosen Jean-François Champollion im frühen 19. Jahrhundert mit den altägyptischen Hieroglyphen gelang: In den Stein von Rosette war derselbe Text auch in demotischer Schrift und in Griechisch eingemeißelt.

Die Indusschrift verbreitete sich in alle größeren urbanen Zentren des Kulturkreises. Hauptsächlich findet sie sich

Alte Glasuren nachgebrannt

Im Industal wurden Armreifen und Perlen sowie mit feinen Reliefs versehene Täfelchen – vermutlich Wertmarken und Weihegaben – auch als so genannte Fayence aufwendig gefertigt. Darunter sind freilich nicht die mit einer zinnoxidhaltigen Glasur überzogenen Tonwaren zu verstehen, die im 15. Jahrhundert vor allem in der italienischen Stadt Faenza produziert wurden (dasselbe Erzeugnis firmiert auch unter dem Namen Majolika entsprechend dem Haupthandelsplatz der spanischen Keramik auf Mallorca). Archäologen verstehen unter Fayence eine bei Temperaturen unter 870 Grad Celsius gebrannte, nicht sehr feste Masse, deren Ausgangsmaterial silikatreicher Kieselsand ist; diese Keramik wird glasiert. Dabei werden die gleichen Rohstoffe verwendet, jedoch fein gemahlen und mit farbgebenden Metallverbindungen gemischt. In Wasser angerührt konnte diese Glasurmasse (fachlich Fritte) auf den gebrannten Ton aufgetragen werden, bei nochmaligem Erhitzen bildete sich die Glasur.

DAVID NEVALA / HARAPPA ARCHAEOLOGICAL RESEARCH PROJECT, MINISTERIUM FÜR ARCHÄOLOGIE UND MUSEEN, PAKISTAN

Hoch entwickelt war auch die Veredelung von Keramik durch Fayence-Techniken. Zusätze von Kupferverbindungen (Mitte) ergaben Glasuren, deren bläuliche und grünliche Färbung der von Türkis oder Lapislazuli glich.

Dieses Verfahren wurde im 5. und 4. Jahrtausend v. Chr. in Ägypten und Nordmesopotamien entwickelt. Es verbreitete sich bis in die Ägäis und in das Industal. Dort waren die Glasuren aber dank einer weiterentwickelten Technik deutlich beständiger. Zuerst wurde Quarz fein zerstoßen, mit Pflanzenasche als Flussmittel versetzt und bei relativ niedriger Temperatur geschmolzen. Die erkaltete glasige Masse hat man erneut und außerordentlich fein pulverisiert (der Durchmesser der Teilchen betrug im Durchschnitt 30 Mikrometer), zum Auftrag auf die Keramik oder den Stein angerührt und dann aufgeschmolzen. Die feinen Partikel der Fritte verbanden sich dabei sehr viel intensiver, als es bei den Glasuren Ägyptens oder Mesopotamiens der Fall war.

Bei Zugabe von Kupferoxid oder dem Kupfermineral Azurit glich die Glasur farblich Türkis beziehungsweise Lapislazuli, bleichte aber nicht wie diese Steine aus, wenn sie in dem heißen und feuchten Klima auf der Haut getragen wurde.

Archäologen hatten zwar immer wieder Relikte der Fayence-Produktion in Harappa entdeckt, aber rund siebzig Jahre lang vergeblich nach den zugehörigen Brennöfen gesucht. Seit wir 2001 die Ruine einer kleinen Werkstatt genauestens erforscht haben, kennen wir den Grund: Es gab nichts dergleichen.

Vielmehr steckten die Kunsthandwerker ihre zu glasierenden Objekte in feuerfeste Gefäße aus speziellem Ton und stellten diese direkt in die offene Glut. Diesen Prozess haben wir nicht nur anhand der Funde von Holzkohle, blasigen gelbgrünen Glasurrückständen und zerbrochenen Brenntöpfen erschlossen, sondern auch experimentell nachvollzogen. In meinem Labor an der Universität in Madison schürten wir ein Holzfeuer derart, dass der Topf mit den zu glasierenden Objekten rot glühend wurde.

Nach etwa drei Stunden begann auch das Brenngut rot-orange zu leuchten und es verbreitete sich ein merkwürdiger Geruch. Ein Sensor zeigte zu dem Zeitpunkt im Inneren des Topfes 935 Grad Celsius an. Diese Temperatur behielten wir etwa eine Stunde bei. Nach dem Abkühlen konnten wir dem Brenngefäß zwar keine so schöne Fayence entnehmen, wie die Meister in Harappa sie gefertigt hatten, aber doch rundum glasierte Täfelchen und Perlen sowie gehärteten Steatit. Im Übrigen gaben Asche, Holzkohle, Scherben und andere Abfälle dem Labor durchaus das Aussehen einer prähistorischen Werkstatt der Induszivilisation.

auf Siegeln im Zusammenhang mit Tieren, unter denen das Einhorn mit 65 Prozent am häufigsten ist. Mithin könnten die figürlichen Darstellungen bedeutende Sippen oder offizielle soziale Klassen repräsentiert haben, die Schriftzeichen gaben vielleicht einen Eigennamen wieder oder wiesen ein Eigentumsrecht aus. Vielleicht ist der einhörnige Stier aber auch das Symbol eines Standes, etwa jenes der Kaufleute.

Zudem wurden große Tongefäße, in denen Handelsgüter transportiert wurden, mit eingeritzten Zeichen versehen, die eventuell den Eigentümer oder den Empfänger und womöglich den Inhalt anzeigten. Auch solche Zeichen auf Bronzegeräten und auf Goldschmuck interpretieren Forscher heute als Namen der Besitzer oder als Wertangabe.

Integration durch Religion

Des Weiteren wurden erstmals in Fundschichten dieser Periode kleine Specksteintäfelchen entdeckt, von denen viele außer einem Symbol und Schrift auch Zeichen tragen, die Zahlen bedeuten könnten. Deswegen meinen manche Forscher, diese Marken enthielten einen Namen, eine Warenbezeichnung und eine Mengenangabe und könnten als Rechenhilfe beim Handel gedient haben. Ähnliche Täfelchen aus Ton und Fayence, die vor dem Brennen mit einem Siegel gestempelt wurden, finden sich relativ häufig in späteren Schichten von Harappa. Manche sind genau in der Mitte gebrochen, das lässt sich am besten als bewusster Akt erklären. Einige Archäologen deuten diese Täfelchen deshalb als Kontrakt, von dem zwei Handelspartner je einen Beleg bekommen sollten. Schließlich wurden in Mohenjo-Daro und Harappa zahlreiche offenbar einem Standard entsprechende Kupfertäfelchen mit Schriftzeichen und Tiermotiven verwendet. Das könnten die frühesten Beispiele einer Art Währung im Industal sein.

Vor drei Jahren entdeckten wir eine Werkstatt, in der Siegel und beschriftete Täfelchen hergestellt worden waren. Dieser und andere Befunde unserer Grabungen ermöglichten es uns, eine neue Chronologie für die Entwicklung der Indusschrift aufzustellen. Waren zuvor alle Siegel und Tafeln gleich behandelt worden, vermögen wir sie nun nach Typen zu trennen und zeitlich einzuordnen. Wir hoffen, dass uns das auch bei den Zeichen gelingt, was neue Ansätze für deren Entzifferung ergäbe.

In der zweiten Hälfte der Harappa-Phase (2300 – 1900 v. Chr.) wuchs die Bevölkerung der urbanen Siedlungen an. Gleichzeitig nahm die Vielfalt von Ornamenten, Geräten und Herstellungstechniken stark zu. Soziologisch bewanderte Archäologen interpretieren dies als Anzeichen für das Bestreben kultureller Gemeinschaften und sozialer Klassen, sich stärker voneinander zu unterscheiden. Dem musste eine herrschende Schicht zwangsläufig eine gemeinsame Ideologie entgegenstellen, um die einzelnen Gruppen zu integrieren.

Schriftzeugnisse dieser Zeit sind tatsächlich mit Szenen kombiniert, die wie Illustrationen mythischer Geschichten wirken. Das legt ihre Verwendung in religiösem Zusammenhang nahe. Wahrscheinlich benutzten spirituelle Führer sie, um das einfache Volk besser mit Ritualen und Gottheiten vertraut zu machen. Eine davon war eine in Yoga-Position sitzende männliche Figur, die eine mit Hörnern versehene Kopfbedeckung trug. Das Motiv taucht vor allem in zwei Zusammenhängen auf, bei der Opferung eines Büffels und umgeben von wilden Tieren. Manche Siegel zeigen auch Göttinnen, einige ebenfalls mit gehörntem Kopfputz, beim Kampf mit einem Tiger. Ein anderes Motiv vieler Siegel und Abdrücke ist eine Gottheit, die gleich zwei Tiger stranguliert; mitunter steht sie dabei auf einem Elefanten. Das erinnert an eine Szene im Gilgamesch-Epos, dem ▷

BEIDE FOTOS: RANDY OLSON (AURORA PHOTOS)

▲ Pilger ziehen über alte Handelswege im Industal von Markt zu Markt (oben). Sie nehmen Bittgebete und Opfer mit zum Grab eines Heiligen und verdienen sich so ihren Unterhalt. Dies ist möglicherweise eine jahrtausendealte Tradition, wie die seit 1986 laufenden Grabungen in Harappa zeigen. Das untere Foto zeigt den Autor, wie er Besuchern einen Grabungsschnitt durch die mächtige Stadtmauer erläutert.

größten literarischen Werk der Babylonier, das einen historischen König von Uruk verherrlicht: Einmal soll dieser gleichzeitig zwei Löwen erwürgt haben. Die Ähnlichkeit der Motive basiert sicherlich auf gleichen Konzepten von Macht und Herrschaft; freilich wissen wir nicht, ob hier ein Transfer von einer der beiden Kulturen in die andere stattgefunden hat.

Ein langsames Ende

Mit zunehmender Differenzierung einer Gesellschaft und womöglich dem Austausch von Ideen mit fernen Ländern, gerieten die führenden Schichten in Ägypten und Mesopotamien unter Druck, ihre Sonderstellung zu legitimieren – Aufstände und Revolten kamen durchaus vor. Dementsprechend ließen sich die Machthaber stets als siegreiche, den Göttern nahe oder gar gottgleiche Übermenschen darstellen, sei es als Statuen, auf Reliefs oder Wandbildern. Am Indus entstanden keine solchen Propaganda-Kunstwerke. Es gibt auch keinerlei Hinweise auf gewaltsame Auseinandersetzungen zwischen dem Herrscher und anderen Mitgliedern der Elite. Dies scheint mir ein einzigartiger Wesenszug der frühen südasiatischen Gesellschaft zu sein, der sicher auf noch älteren Traditionen beruht.

Bisher galt als Lehrmeinung, dass die Städte der Induszivilisation um 1750 v. Chr. in kürzester Zeit aufgegeben und verlassen wurden. Doch unseren jüngsten Untersuchungen zufolge war Harappa viel länger bewohnt, sogar übervölkert. Allerdings wurden in dieser Spätphase, die von 1900 bis 1300 v. Chr. dauerte, Abwassersysteme und Schutzmauern vernachlässigt. Dieser Verfall zeigt an, dass die Eliten das urbane Zentrum nicht mehr funktionsfähig halten konnten und die soziale Ordnung zusammenbrach.

Diesem Autoritätsverlust der Oberschicht folgte ein allgemeiner Niedergang der Gesellschaft, und zwar nicht nur in Harappa, sondern in der gesamten Region, denn gleichartige Veränderungen betrafen auch Metropolen wie Mohenjo-Daro oder Dholavira im heutigen westlichen Indien. In den Fundschichten fehlen mehr und mehr die eigentümlichen Keramiken und Siegel; auch die würfelförmigen Gewichte kamen offenbar außer Gebrauch. Siedlungsschichten im Norden enthalten keine Muschelschalen mehr, während in den Flussniederungen der Lapislazuli aus den Bergregionen fehlt – der Handel zwischen entfernten Regionen kam zum Erliegen. Auch Keilschrifttexte aus Mesopotamien erwähnten die Region nicht mehr.

Die Ursachen waren gewiss vielfältiger Art. Zum einen hatten zuvor die Ausweitung des Handels und die Gründung von Niederlassungen bis hin zur Flussregion der Ganges und zum heutigen Bundesstaat Gujarat im Westen Indiens das wirtschaftliche und politische System strapaziert. Zum anderen änderten einige Nebenflüsse des Indus im Pandschab sowie parallel zu ihm fließende Ströme ihren Lauf, und zahlreiche Siedlungen an den nun austrocknenden Betten mussten aufgegeben werden. Die Bewohner wanderten in weiterhin ertragreiche Gegenden ab oder in urbane Zentren wie Harappa und Mohenjo-Daro. Doch weder die Agrargebiete noch die Städte waren stärkerem Zustrom gewachsen, und mangels militärischer Tradition hatte die Führungsschicht keinerlei Machtmittel, um die Handelswege intakt zu halten und den Strom der Wirtschaftsflüchtlinge zu dirigieren.

Die Spuren verwischen sich

Den Wandel verstärkte und beschleunigte die Einwanderung von Völkerschaften, die indogermanische Idiome sprachen, mit Pferden und Streitwagen gerüstet waren und sich als Arya – Arier in der Bedeutung Edle – bezeichneten. Wohl schon seit Mitte des 2. vorchristlichen Jahrtausends drangen sie durch den Pandschab nach Osten vor und eroberten weite Teile Nordindiens, wurden aber nur zögerlich sesshaft. Etwa von 900 v. Chr. an gelangten sie in die Ganges-Ebene.

Ihre mythischen Vorstellungen von einer Vielzahl von Göttern sind in den Veden enthalten, die auch das Kastensystem begründeten. Diese älteste Sammlung religiöser Literatur der Inder ist eine Hauptquelle ihrer frühen Geschichte. Archäologische Befunde über diese Zeit am Indus sind kaum zu gewinnen, da die entsprechenden Siedlungsschichten zumeist durch Erosion oder Abbruch der Ruinen zu neuerlicher Verwendung der Ziegel zerstört beziehungsweise überbaut wurden. Sicher ist, dass die Einwohner weiterhin Keramik und Fayence herstellten sowie Kupfer und Bronze verarbeiteten. Perlen aus Glas waren in Harappa schon um 1700 v. Chr. gefertigt worden, zwei Jahrhunderte bevor die Ägypter das Material kannten. Zwischen 1200 und 800 v. Chr. wurden vielerorts im nördlichen Pakistan und Indien auch gläserne Flaschen und Schmuckreifen produziert. Zur selben Zeit kam an Indus und Ganges die Eisengewinnung auf und ein neues Zeitalter brach an.

RANDY OLSON (AURORA PHOTOS) / HARAPPA ARCHAEOLOGICAL RESEARCH PROJECT, MINISTERIUM FÜR ARCHÄOLOGIE UND MUSEEN, PAKISTAN

Für kostbare Güter wie Edelmetalle und Schmucksteine gab es in den Städten der Induszivilisation ein standardisiertes Gewichtssystem aus steinernen Würfeln, dessen kleinste Einheit 1,13 Gramm betrug.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



Jonathan Mark Kenoyer ist Professor für Anthropologie an der Universität von Wisconsin in Madison. Der Schwerpunkt seiner Arbeit liegt auf der Induskultur in Pakistan und Indien. Seit 1986 ist er Kodirektor und Grabungsleiter des Harappa Archaeological Research Project.

Die Indus-Zivilisation. Wiederentdeckung einer frühen Hochkultur. Von Michael Jansen. DuMont, Köln 1986

The Indus valley mystery. Von Richard H. Meadows und Jonathan Mark Kenoyer in: Discovering Archaeology, Bd. 2, Heft 2, S. 38, 2000

Trade and technology of the Indus valley: New insights from Harappa, Pakistan. Von Jonathan Mark Kenoyer in: World Archaeology, Bd. 29, Heft 2, S. 262, 1997

Deciphering the Indus script. Von Asko Parpola. Cambridge University Press, 1994

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.



Eine beispiellose Fälschung

Die erneute Untersuchung der 1912 von dem Sussexer Rechtsanwalt Dr. Charles Dawson, z. T. unter Mitwirkung von Dr. Arthur Smith Woodward vom Britischen Museum London in einer Kiesgrube bei Piltdown (Sussex) gefundenen Knochen, die zur Aufstellung des Morgenröte-Menschen *(Eoanthropus dawsoni)* geführt hatten, erbrachte ein überraschendes Ergebnis: … Die Schädelteile sind zwar echte Überreste eines primitiven Menschen, der Unterkiefer und der Eckzahn aber … einem neuzeitlichen Affen zuzurechnen. In dem Bericht heißt es u. a.: ›Die Fälschung des Unterkiefers und des Eckzahnes sind so ungewöhnlich geschickt, die Ausführung des Betruges so gewissenlos und unerklärlich, daß sich in der Geschichte paläontologischer Entdeckungen keine Parallele findet.‹ *(Kosmos, 50. Jg., Heft 12, 1954, S. 2)*

▼ Wer hat nur den berühmten Piltdown-Menschen gefälscht?



Entdeckung des Planetoiden Quetzalcoatl

Am 9. März 1953 endeckte A. G. Wilson mit dem 48-zölligen Schmidt-Teleskop der Mount-Palomar-Sternwarte im Sternbild des Großen Bären einen ungewöhnlich Kleinen Planeten, dessen tägliche Bewegung mit mehr als 5 Grad sogar die des Planetoiden Icarus zur Zeit seiner Auffindung übertraf. Eine so große Bewegung am Himmel deutete auf einen sehr kleinen Abstand des Planeten von der Erde hin, und tatsächlich ergab die Rechnung, daß er bei seiner Auffindung nur 7 Millionen Kilometer … von der Erde entfernt war. Die Bahn des neuen Planetoiden berührt in ihrem sonnennächsten Punkt etwa die Erdbahn von außen und erstreckt sich in der Sonnenferne bis in die Mitte zwischen Mars- und Jupiterbahn. *(Orion, 9. Jahrgang, Nr. 3/4, 1954, S. 163)*

Urzeugung im Laboratorium

Die Bildung einfachster, mikroskopischer oder ultramikroskopischer Lebewesen aus anorganischem Material bezeichnet man bekanntlich als Urzeugung. Die wichtigsten Träger der Lebenserscheinungen sind in der außerordentlich mannigfaltigen Gruppe der Eiweißkörper zu erblicken. … Stanley L. Miller, ein Schüler von Urey, ließ im Jahre 1953 an der Universität Chicago in einem luftdichten, von siedendem Wasser umgebenen Glasapparat etwa eine Woche lang elektrische Entladungen auf ein Gemisch von Methan, Ammoniak und Wasserstoff einwirken. Es entstand hierbei eine schmutzigrote Masse, in der man mit Hilfe der Papierchromatographie kleine Mengen von Aminosäuren (Aminoessigsäure, Alanin usw.) nachweisen konnte. Von solchen Aminosäuren bis zu »lebendigen« Eiweißkörpern ist es freilich noch ein weiter Weg; aber es wird hier immerhin gezeigt, wie die ersten Eiweißbruchstücke entstanden sein könnten. *(Komos, 50. Jg., Heft 2, 1954, S. 126)*



Für römische Zeichner unentbehrlich

Ein interessanter Fund wurde jüngst auf dem Kastell Verician (»Wirzburg«) bei Weißenburg a. S. gemacht, nämlich ein zusammenlegbarer römischer Maßstab, der zugleich als Zirkel benutzt werden konnte. Er ist aus Bronze, im Querschnitt fast quadratisch und genau einen Fuß lang, in der Mitte mit einem Scharnier versehen. … Bemerkenswert ist die Einteilung auf drei seiner Flächen. Sie ist nicht durch Striche, sondern mit Punkten markiert, und zwar 12 Pollices, 16 Digiti und 4 Palmi. Ein zweites Exemplar, ein ähnlicher Maßstab, besitzt nur noch das Museum in Neapel. Dieser wurde bei den Ausgrabungen in Pompeji gefunden. *(Beilage zur Allgemeinen Zeitung, Nr. 25, 1904, S. 199)*

Das Rätsel des Radiums

Radium wird immer geheimnisvoller. Der Widerspruch gegen unsere gesamte physikalische Naturanschauung, der darin liegt, daß ein Körper unaufhörlich Energie ausstrahlt, ohne daß man im stande wäre, eine Quelle für dieselbe anzugeben, wird im hohen Grade verschärft durch die Entdeckung einer neuen wunderbaren Eigenschaft des mysteriösen Stoffes. Wie Curie und Delaborde der Pariser Akademie mitteilten, ist das Radium auch ein beständiger Erzeuger von Wärme. Seine Temperatur erhält sich unter allen Umständen 1,5 Grad über der Temperatur der Umgebung. Ein Irrtum der Beobachter ist gänzlich ausgeschlossen. *(Der Stein der Weisen, Bd 31, 1904, S. 71)*

Hoch zu Ross oder hoch zu Strauß?

Den Reittieren, welche in den verschiedensten Teilen der Welt Verwendung finden, hat man in neuerer Zeit auch den Strauß beigesellt. Ein sonderbares Reittier, wird mancher denken. Nun, der Vogel Strauß ist kräftig genug, einen erwachsenen Mann zu tragen und mit dem Reiter auf dem Rücken … eine große Schnelligkeit zu entwickeln. Sobald die … Strecke nicht länger als etwa eine halbe Meile war, zeigte sich der Strauß selbst einem guten Rennpferde ebenbürtig, wenn nicht sogar überlegen. Auf längeren Strecken freilich läßt seine Schnelligkeit nach, doch trägt er seinen Reiter mit der größten Ausdauer oft meilenweite Entfernungen. *(Das Neue Universum, 25. Jg., Bd 25, 1904, S. 2)*



◀ Schräger Vogel auf schnellem Vogel: Straußenreiter in Afrika

WISSENSCHAFT IM RÜCKBLICK

Wie wir lernen, die Welt zu begreifen

Durch Vergleichen von Eindrücken auf die verschiedenen Sinnesorgane lernen schon Neugeborene die Dinge um sich herum kennen – und sich selbst.

Von Arlette Streri

ARTHUR TILLEY / TAXI / GETTY IMAGES

Bei so gut wie allen Alltagshandlungen gebrauchen wir mehrere Sinne zugleich – sei es, dass wir in der Handtasche nach dem Wohnungsschlüssel wühlen, uns einem Geräusch zuwenden, essen, trinken oder Auto fahren.

Obwohl jeder unserer Sinne andere physikalische Informationen aufnimmt, erleben wir die Welt erstaunlicherweise als Einheit. Wir empfinden es als selbstverständlich, dass es ein- und dasselbe Objekt ist, das wir in den Händen halten, fühlen und betrachten. Normalerweise fällt es uns auch nicht schwer, einem Gegenstand Geräusche zuzuordnen. Damit dergleichen gelingt, müssen sich die Sinnessysteme austauschen.

Aber nur teilweise erfassen sie dieselben Eigenschaften der Objekte. So lässt sich die Größe eines Gegenstands sehen und fühlen. Seine Farbe jedoch können wir weder hören, riechen noch ertasten. Um uns zurechtzufinden, benötigen wir normalerweise sämtliche Sinneskanäle. Die Frage ist, wie es gelingt, die Welt nicht zerstückelt wahrzunehmen. In diesem Artikel soll es darum gehen, wie Säuglinge mit diesem Problem zurechtkommen.

So wichtig die Koordination der Sinnessysteme ist – Wahrnehmungspsychologen erforschen gewöhnlich die Funktionsweise einzelner Sinne. Das mag daran liegen, dass sich die Eindrücke von den verschiedenen Kanälen nicht einfach addieren oder subtrahieren. Mit dem Rätsel des Austauschs zwischen den Sinnen befasste sich schon der griechische Philosoph Aristoteles (384–322 v. Chr.) in seiner Schrift »Über die Seele«. Doch erst heute beginnen sich erste empirisch gesicherte Antworten abzuzeichnen.

Auch die Frage, ob die Sinne schon beim Säugling miteinander kommunizieren – oder, falls nicht, in welchem Alter diese Fähigkeit auftritt –, beschäftigt Gelehrte seit alters her. In den letzten Jahrhunderten, bis ins 20. Jahrhundert hinein, konkurrierten zwei Auffassungen: der Empirismus und der Nativismus. Ersterer befand, dass die Koordination der Sinne auf Erfahrung beruht, Letzterer sah die Funktion als von Geburt an gegeben.

Der empiristischen Position zufolge muss ein Baby lernen, dass ein Glöckchen, welches es sieht und das klingelt, derselbe Gegenstand ist, den es in der Hand hält. Erst wiederholte Erfahrung zeigt ihm, dass hier mehrere Wahrnehmungen – Sehen, Fühlen und Hören – zusammengehören. Das Wort »Glocke«, das es später lernt, hilft nach dieser Auffassung das Gelernte noch zu festigen.

Der empiristische Ansatz herrschte vom 18. bis in die erste Hälfte des 20. Jahrhunderts vor. Bezeichnend dafür war ein Problem, das der Ire William Molyneux im Jahr 1689 seinem Freund,

Sehen, Hören, Tasten: Manche Wahrnehmungen können sogar Neugeborene an andere Sinne weitergeben. Schon die Welt des Säuglings ist eine Einheit.

dem englischen Philosophen und Psychologen John Locke (1632–1704), vorlegte: Wenn die Verbindung der Sinne nicht auf Lernen beruhte, müsste ein blind Geborener, der als Erwachsener die Sehkraft erlangt hat, auf Anhieb – allein durch Anschauen – eine Kugel von einem Würfel unterscheiden können. Andernfalls würde die Koordination der Sinne auf reiner Erfahrung basieren.

Die nativistische Position geht letztlich auf den griechischen Philosophen Demokrit (um 300 v. Chr.) zurück, wenn auch die Bezeichnung Nativismus in seiner psychologischen Bedeutung erst im 19. Jahrhundert aufkam. Nach dieser Vorstellung gäbe es eine angeborene, alle Sinne übergreifende Wahrnehmung, so etwas wie eine ursprüngliche Einheit der Sinne. Diese Theorie gewann erst in den 1960er Jahren an Boden. Wegbereitend waren Arbeiten der amerikanischen Neurowissenschaftler Barry Stein und Alex Meredith.

Neuronen für den Sinnestransfer

Sie fanden bei Katzen eine Hirnregion mit Nervenzellen, die ausschließlich aktiv sind, wenn zwei Sinnessysteme zugleich dieselbe Sache erfassen, wenn also zum Beispiel Tastsinn und Gesichtssinn denselben Gegenstand wahrnehmen.

Nach heutiger Kenntnis sind beide Theorien zu extrem. So erwiesen neuere Wahrnehmungsexperimente mit Säuglingen teilweise recht komplizierte Beziehungen. Das möchte ich für den Transfer zwischen Fühlen und Sehen sowie den zwischen Hören und Sehen veranschaulichen.

Physiologen wissen heute, dass die einzelnen Sinne beim Kind nicht zu gleicher Zeit erscheinen und reifen. In der Mehrzahl sind sie schon vor der Geburt funktionstüchtig. Als Erstes tritt der Tastsinn auf: Ab etwa der siebten Schwangerschaftswoche reagiert das Kind, wenn die Mutter über ihren Bauch streicht. Voll funktionsfähig ist dieses Sinnessystem jedoch erst beim einjährigen Kind. Hör-, Geschmacks- und Geruchssinn übermitteln dem Fetus im letzten Schwangerschaftsdrittel Eindrücke von der Außenwelt: Geräusche nimmt er durch die Bauchdecke wahr, Geschmacks- und Geruchseindrücke ▷

▷ durch das, was die Mutter isst. Dagegen tritt der Sehsinn erst mit der Geburt wirklich in Funktion. Doch dann entwickelt er sich rasch und wird ab dem sechsten Lebensmonat zum dominierenden Wahrnehmungssystem.

Eine unserer Versuchsreihen sollte klären, inwieweit Säuglinge ein Objekt mit den Augen wiedererkennen, wenn sie es vorher nur fühlen, aber nicht sehen konnten. Wir nutzten ein natürliches Verhalten sehr kleiner Kinder: Säuglinge verlieren nach einiger Zeit das Interesse an Objekten, wenn man sie ihnen wiederholt zeigt. Sie wenden ihre Aufmerksamkeit dann gern etwas Neuem zu.

Für die Versuche lag das Kind halb sitzend in einer Babyschale. Ein Tuch war so unter seinem Kinn gespannt, dass es seine Hände nicht sah (Bild rechts). Nun bekam es mehrmals dasselbe kleine Objekt in die Hand, zum Beispiel einen kurzen runden Stab, den es befühlen konnte. Babys pflegen einen Gegenstand, den man ihnen wiederholt gibt, nach einiger Zeit immer rascher wieder loszulassen. Das gilt als Zeichen, dass das Kind Eigenschaften des Objekts wahrgenommen hat und sich daran erinnert. Der runde Stab war ihm jetzt bekannt und wurde offensichtlich langweilig.

Nun folgte der zweite Teil des Experiments. Wir nahmen das Tuch fort und zeigten dem Säugling den Stab und ein ihm unbekanntes Objekt zehnfach vergrößert (Bild Seite 56 oben). Wir verglichen, wie oft und wie lange das Kind jedes der beiden Dinge betrachtete. Würde es das neue Objekt mehr anschauen als das alte, wäre das ein Zeichen, dass es das alte als bekannt und darum weniger interessant abtat – obwohl es dieses Ding doch noch nie vor Augen gehabt hatte. Falls es auf die beiden Objekte verschieden reagierte, hätte ein Austausch vom Tast- zum Sehsinn stattgefunden.

Komplexe Funktionen

Der Versuchsablauf mag einfach erscheinen, doch die Leistung des Kindes ist keineswegs simpel. Es muss aufmerksam sein, sein Gedächtnis gebrauchen und seinen Wahrnehmungs- und Denkapparat einsetzen. Das alles erfordert komplexe psychische Mechanismen.

Beim Betasten sammelt das Kind teilweise andere Informationen über das Objekt als beim Sehen. Manche passen zusammen, etwa die Form, andere erfährt es beim Anschauen erstmals. Das gilt besonders für die Farbe, die beim Sehen ganz besonders zählt. Gewicht und Wärme des Objekts kann das Baby fühlen, aber nicht sehen. Falls es entscheidet, dass es den Gegenstand schon kennt, hätte es die Objekteigenschaften in Kategorien sortiert: in solche, die von beiden Sinnessystemen erfasst werden, und in andere. Dadurch könnte es bei der Erkundung seiner Welt Zeit sparen, denn es muss nicht jeden Gegenstand jedes Mal ganz neu erforschen.

Wir führten das Experiment unter anderem mit durchschnittlich drei Tage alten Neugeborenen durch. Das jüngste Kind war 16 Stunden alt. Um sicher zu gehen, dass keine angeborene Präferenz für eines der Objekte besteht, machten wir die Sehtests zur Kontrolle auch mit einer Gruppe gleich alter Babys, die das runde Klötzchen vorher nicht in die Hand bekommen hatten.

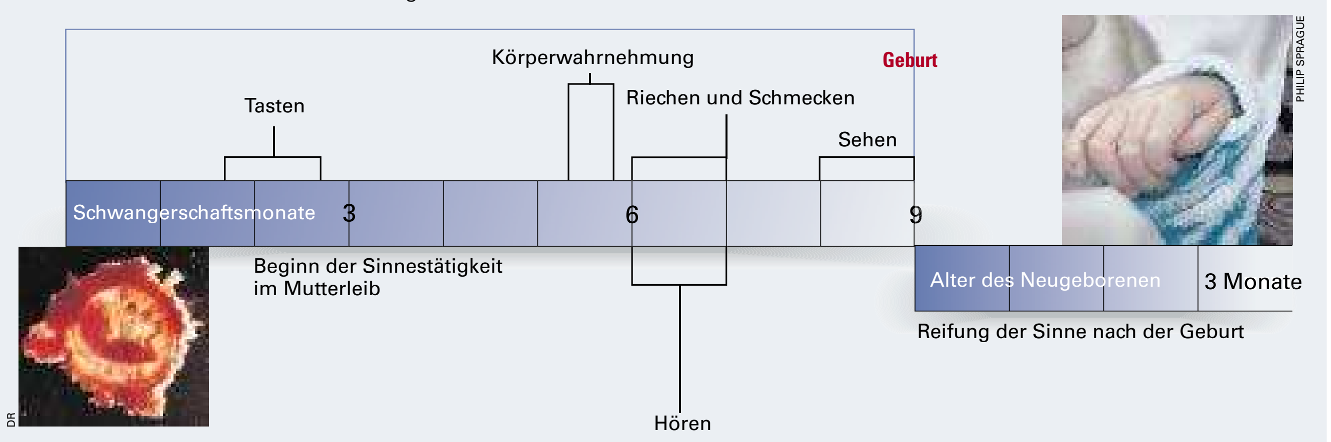
Das Ergebnis war klar: Babys, die den Stab hatten betasten dürfen, schauten mehr zu dem neuen Objekt. Die Kinder der Kontrollgruppe sahen dagegen beide Klötze gleich viel an. Beide Gruppen blickten zwischen den Objekten viele Male hin und her. Allerdings taten dies die Kinder der Versuchsgruppe öfter. Der Befund zeigt, dass Neugeborene ein Objekt, das sie bisher nur über den Tastsinn kennen, beim reinen Anschauen wiedererkennen können. Für Säuglinge dieses Alters existiert demnach angeborenermaßen ein Transfer vom Tast- zum Sehsinn.

Nach einer anderen Studie ist eine Übertragung vom Tast- zum Sehsinn auch im Alter von einem Monat möglich. Der amerikanische Psychologe Andrew Meltzoff von der Universität von Washington in Seattle fand bei einen Monat alten Säuglingen eine Übertragung zwischen Mund und Augen. In dem Fall ging es nicht um die Form, sondern um die Oberflächenstruktur: um Schnuller, die entweder eine glatte oder eine noppenbesetzte Oberfläche hatten.

Zwar ließen sich diese Ergebnisse bis heute nicht reproduzieren. Doch Elea-

Reifung der Sinne

Wenn die Sinne beim Kind zu funktionieren beginnen, sind sie längst nicht ausgereift. Tastrezeptoren arbeiten bereits in den ersten Schwangerschaftsmonaten, doch erst beim zwölf Monate alten Kind ist der Tastsinn voll ausgebildet. Auf starkes Licht reagiert der Fetus schon vor der Geburt. Zwar vermag ein Kind schon im ersten Lebensjahr gut zu sehen, aber erst im Alter von einem Jahr ist sein Gesichtssinn wirklich reif.



nor Gibson von der Universität Cornell in Ithaca (US-Bundesstaat New York) gelang ein ähnlicher Versuch mit ebenfalls einen Monat alten Babys. Auch hierbei übertrugen die Säuglinge beim Saugen gefühlte Eigenschaften des Schnullers auf den Sehsinn. Manche Schnuller waren hart, andere weich gewesen. Den Kindern wurde dann ein großer Schnuller vor die Augen gehalten, der sich entweder ziemlich starr verhielt oder wabbelig nachgab. Am intensivsten betrachteten sie jeweils den Schnullertyp, an dem sie nicht genuckelt hatten.

Würde der Transfer auch in umgekehrter Richtung auftreten? Erkennen Kinder dieses Alters etwas zuvor Gesehenes wieder, wenn sie es nur fühlen? Träfe das – gemäß der nativistischen Sichtweise – zu, spräche dies tatsächlich für eine ursprüngliche Einheit der Sinne, aus der erst später die spezifischen Sinnessysteme erwüchsen.

Übertragung jeweils nur in einer Richtung

Die Tests, die wir dazu mit zwei und fünf Monate alten Babys durchführten, brachten verblüffende Resultate. Wie Neugeborene auch erkannten zwei Monate alte Kinder ein zuvor angefasstes Objekt beim Ansehen offenbar an der vorher gefühlten Form wieder. Beim umgekehrten Versuch versagten sie aber: Sie schienen nicht zu merken, dass sie den Gegenstand, den sie fühlten, schon öfter angeschaut hatten. Genau das aber können Kinder mit fünf Monaten: ein zuvor nur betrachtetes Objekt rein durch Betasten wiedererkennen. Allerdings gelingt ihnen jetzt die umgekehrte Übertragung nicht mehr – mit den Augen etwas zu erkennen, was ihnen nur vom Tasten her vertraut ist. Den Transfer in beide Richtungen meistern sie in diesem Alter also genauso wenig wie die jüngeren Säuglinge. Das schaffen übrigens auch ältere Kleinkinder, größere Kinder und Erwachsene nicht.

Der Befund für zwei Monate alte Babys dürfte sich aus dem unreifen Tastsinn der Hände erklären. In diesem Alter erfasst der Sehsinn Objekteigenschaften besser. Das, was der Tastsinn an Informationen aufnehmen kann, genügt dem Sehsinn, nicht aber umgekehrt.

Bei fünf Monate alten Kindern ist der Tastsinn der Hände weiter entwickelt, und sie können gesehene Informationen dabei verwerten. Allerdings wollen sie ihre Hände jetzt für anderes gebrauchen: Sie benutzen sie nun als Werkzeug, um Dinge unter der Kontrolle des Gesichtssinns im Raum zu bewegen und zu transportieren. Das Betasten der Gegenstände verliert zeitweise an Bedeutung.

Kinder dieses Alters lassen es sich nicht mehr gefallen, wenn man ihnen mit einem Tuch die Sicht auf ihre Händchen nimmt. Das Halbjährige will die Dinge nicht blind befühlen, sondern sie vor die Augen oder zum Mund führen. In dieser Weise erweitert es jetzt seinen Erkundungsraum. Hände, Mund und Augen betreiben die Erforschung der Welt nun gemeinsam, wobei sich Mund und Hände in das ertastende Erforschen vorübergehend teilen. Der Wettstreit zwischen beiden hilft dabei, dass dem Kind möglichst keine der Eigenschaften des untersuchten Objekts entgehen. Die neu erreichte Kompetenz, die Dinge zu ergründen, unterbindet nicht, sondern verstärkt sogar das Zusammenspiel der Sinne.

Somit lassen sich weder die empiristische noch die nativistische Sicht bestätigen. Nach Ersterer dürfte es keinen angeborenen Transfer geben, nach Letzterer keine rein einseitige Übertragung.

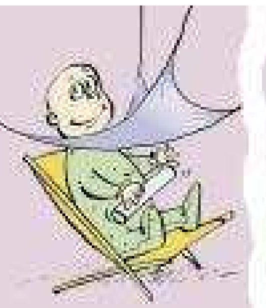

A. STRERI

▲ In dieser Vorrichtung kann das Kind Gegenstände betasten, ohne sie zu sehen. Junge Säuglinge lassen sich das gefallen. Ältere sträuben sich gegen die Sichtbehinderung beim Hantieren.

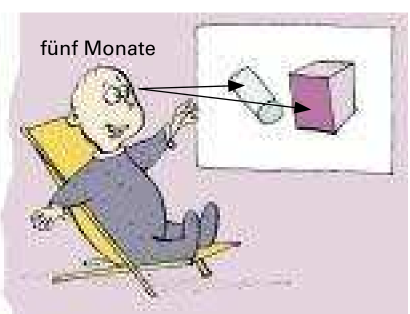
Nun ist der Tastsinn ein Nahsinn, der Gesichtssinn aber ein Fernsinn – wie der Hörsinn auch. Um sich in der Umwelt zurechtzufinden, sollten die beiden letzten folglich einander teilweise ersetzen können und darum eher im Austausch stehen. Dass geschieht im Alltag tatsächlich oft.

In vielen Situationen gehören für uns Geräusche und visuelle Erscheinung zusammen, etwa beim tropfenden Wasserhahn oder bei einem vorbeifahrenden Auto. Zum Sprechen gehört die Lippenbewegung, zum Tanz die Musik, zum Orchesterklang das Dirigieren. Dass der Blitz dem Donner scheinbar vorausgeht, muss man einem Kind erst erklären.

Um bei kleinen Kindern Verbindungen zwischen Sehen und Hören zu untersuchen, konfrontieren Wahrnehmungspsychologen sie gern mit zwei konkurrierenden Bildern – oder Fil- ▷







J. - M. THIRIET

Sehr kleine Kinder begucken lieber ein neues Objekt und nicht ein bekanntes, auch wenn sie das bekannte vorher nur anfassen durften und nie gesehen haben. Ältere Säuglinge reagieren auf beide Objekte gleich stark.

men – und zugleich Geräuschen, die nur zu einem der beiden Bilder passen. Man registriert dann, ob die Kinder das zum Ton passende Bild betrachten. Die Bilder werden in solchen Experimenten nebeneinander gezeigt und der Lautsprecher steht genau in der Mitte zwischen beiden. Erfahrungsgemäß blicken schon kleinere Kinder zu dem passenden Bild. Ihnen gelingt es also offenbar, die Verbindung zwischen gleichzeitigen akustischen und visuellen Ereignissen herzustellen.

Von welchem Alter an können sie das? Wie Studien zeigen, wächst diese Fähigkeit bei Säuglingen in dem Maße, wie sie begreifen, dass Bild und Geräusch zusammengehören, und wie sie erfassen, dass ein Geräusch von der Art des Objekts abhängt. Ersteres verstehen sie allerdings eher. Zum Beispiel staunt schon ein drei Monate alter Säugling, wenn der Ball auf den Boden springt, der Aufschlag aber erst später zu hören ist. Erst mit frühestens sechs Monaten merken Kinder, ob das Geräusch zu dem Objekt überhaupt passt.

Wir haben das mit durchsichtigen Rasseln ausprobiert. Die eine enthält eine einzige große Kugel, die andere viele kleine. Den Klang beider Rasseln nahmen wir getrennt auf Tonband auf. Erst mit sechs Monaten blickten die Kinder beim Abspielen des Geräuschs zur richtigen Rassel. Unter bestimmten Voraussetzungen gelingt das auch manchmal schon vier Monate alten Säuglingen, doch noch früher können Kinder das nicht.

Demnach entwickelt sich die Fähigkeit, zwei Ereignisse miteinander zu verknüpfen, offenbar erst mit vier bis sechs Monaten. Allerdings hatten Alan Slater und seine Kollegen von der Universität Exeter (Großbritannien) 1999 durch ein Konditionierungstraining schon Neugeborene dazu gebracht, an sich neutrale Töne mit etwas Gesehenem in Beziehung zu bringen. Jedes Mal, wenn die Forscher den Säuglingen einen farbigen geometrischen Körper zeigten, erklang ein bestimmter Ton. Da die Kinder den Bezug im Alter von wenigen Tagen erlernten, muß von Geburt an eine Verbindung zwischen den Sinnen bestehen.

Sehen und Hören verknüpfen

Erwachsene bringen, wenn sie andere ansehen und sprechen hören, auch den emotionalen Ausdruck von Stimme und Gesicht in Beziehung zueinander. Ab wann können das kleine Kinder? Wir führten fünf und sieben Monate alten Babys zwei Filme nebeneinander vor: Auf einem sah man einen Menschen mit traurigem Gesichtsausdruck sprechen, auf dem anderen einen mit fröhlichem Gesicht (Bilder unten). Dazu erklangt aus dem Lautsprecher dazwischen einmal eine fröhliche, einmal eine traurige Stimme. Schon die fünf Monate alten Babys schauten am meisten das Gesicht an, dessen Ausdruck zur Stimme passte. Waren die Gesichter teilweise verdeckt, half es den Kindern am meisten, wenn sie die Augen sahen.

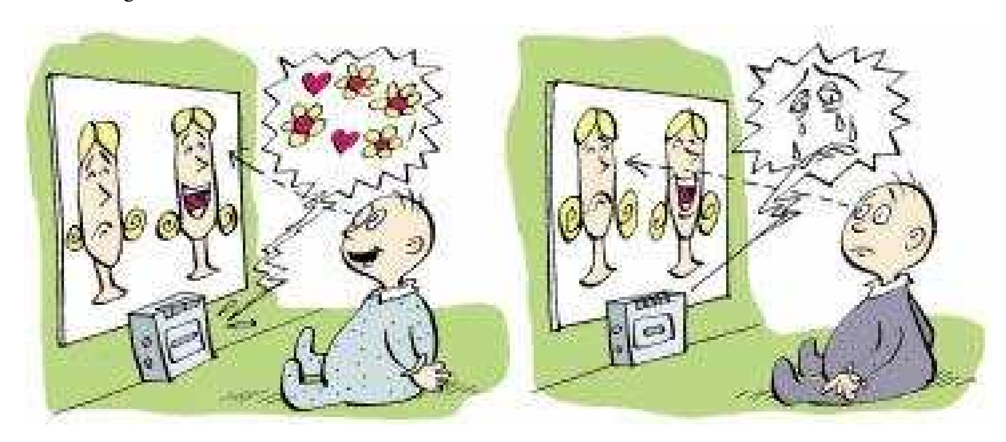
An sich genügt, um Sprache zu verstehen, allein das Gehör. Auch ein Baby in der Wiege reagiert auf Stimmen im Zimmer, obwohl es die Personen nicht sehen kann. Andererseits richten wir uns auf einer lauten Party nach den Lippenbewegungen des Gesprächspartners. Wenn gehörter Laut und Mundstellung nicht zusammenpassen, kommt es allerdings vor, dass wir einen völlig anderen Laut zu hören meinen. Sieht man zum Beispiel auf einem Bildschirm eine Person die Silbe »ba« formen und hört dazu vom Tonband »da«, glaubt man »ga« zu vernehmen. Diesen Effekt muss man beim Synchronisieren von Filmen berücksichtigen.

Bauchredner und Marionettenspieler nutzen, dass wir am meisten unseren Augen glauben und unsere Fantasie uns vorgaukelt, dass tatsächlich die Puppe spricht. Wir sehen sie passend zur Rede gestikulieren und sich bewegen, vielleicht sogar den Mund öffnen und schließen, während das Gesicht des Bauchredners unbewegt bleibt.

Sprechen lernt ein Kind teilweise über beide Kanäle zugleich. Wie Patricia Kuhl von der Universität von Washington nachwies, bringen Babys gesehene Lippenstellung und gehörten Laut zueinander in Beziehung. Achtzehn bis zwanzig Wochen alte Säuglinge erkennen schon bei vielen Lauten und Silben, zu welcher von zwei gezeigten Mundstellungen das Gehörte passt.

Ab wann nimmt ein Kind sich selbst als eigenständig, von der Umwelt abge-

Im Alter von fünf Monaten verknüpfen Kinder Bilder und Töne. Erklingt eine traurige Stimme, blicken sie zum traurigen Gesicht und umgekehrt. Vorher tun sie das nicht.



A. N. MELTZOFF UND E. FERORELLI

Neugeborene imitieren Fratzen, die man ihnen vormacht – wie auch immer sie wissen mögen, welchen Gesichtsausdruck sie selbst erzeugen.

grenzt wahr? Die Fähigkeit, zwischen den Sinnen Informationen zu übertragen, spielt dabei wesentlich mit. Nach den klassischen Entwicklungstheorien bildet der Säugling zunächst vor allem eine Einheit mit der Mutter, als wäre er ein Körperteil von ihr. Dem widersprechen aber verschiedene Beobachtungen. Erstaunlich früh unterscheiden Babys Sinneseindrücke, die von außen kommen, von Wahrnehmungen, die sie an sich selbst erzeugten.

Frühe Erkundung des Körpers

So berühren schon sehr junge Babys auffallend oft mit den Händchen Gesicht und Mund. Auf diese Weise erfahren sie offensichtlich etwas über ihre eigene Bewegungsaktivität und deren Zusammenhang mit bestimmten Berührungsreizen sowohl an den Händen als auch im Gesicht. Nicht nur der Tastsinn wird tätig, sondern auch Sinneszellen in den Gliedern, die Bewegungen registrieren. Interessanterweise geht eine Berührung des Mundes mit der Hand niemals mit einem Suchreflex einher – wie es bei einem Fremdreiz in diesem Alter immer der Fall ist. Demnach kann das Kind schon so früh unterscheiden, ob ein Reiz von außen kommt oder ob es ihn selbst herbeigeführt hat.

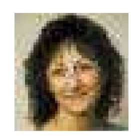
Noch eine andere Beobachtung ist aufschlussreich. Selbst sehr junge Babys ahmen Gesichtsausdrücke nach. Streckt man ihnen die Zunge heraus oder zwinkert sie an, tun sie das Gleiche (Bild oben). Sie scheinen von Geburt an ein Wissen von ihren Gesichtsbewegungen zu haben, das so weit geht, dass sie zwischen den ihnen verfügbaren Ausdrücken jenen wählen können, den auch das Gegenüber zeigt. Alles in allem gewinnt schon das sehr kleine Kind reichlich Erfahrungen, an denen es den Unterschied zwischen eigener Tätigkeit und Vorgängen in der Außenwelt bemerkt. Es erlebt etwas anderes, wenn es berührt wird, sich selbst berührt oder wenn es jemanden oder etwas außerhalb des eigenen Körpers berührt.

Beim Austausch zwischen zwei Sinnessystemen summieren sich nicht die Leistungen beider Sinne. Vielmehr hängt das Ergebnis von der Art der jeweils einbezogenen Wahrnehmung ab. Beim Kind spielt neben dem Reifegrad der beteiligten Sinne auch mit, welche Art von Information die einzelnen Sinne der Umwelt jeweils entnehmen.

Von Geburt an vermag das Kind zum einen zwischen Reizen zu unterscheiden und zum anderen Veränderungen in seiner Umwelt zu erkennen. Es bemerkt, durch welchen Sinn, ob mit den Händen oder über die Ohren, es das Geschehen registriert. Manches interessiert es mehr als anderes, und manche Eindrücke bevorzugt es. So betrachtet es lieber gemusterte Objekte als einfarbige, also lieber eine Kugel aus bedrucktem Zeitungspapier als einen Ball, selbst wenn der rot ist. Und es bevorzugt den Geruch seiner Mutter vor dem einer anderen Frau.

Von Geburt an verfügt ein Säugling über die neuronale Ausstattung, um mit Hilfe seiner Sinne Unterscheidungen zwischen verschiedenen Reizen zu treffen und veränderte Verhältnisse zu erkennen. Dies bildet die Grundlage für den Austausch zwischen den Sinnessystemen. Dank der Verbindung der Sinne können bereits Babys Anforderungen der Umwelt schnell und effektiv begegnen. Das ist die Basis des Lernens. ◁

AUTORIN UND LITERATURHINWEISE



Arlette Streri ist Professorin für Kinderpsychologie am Psychologischen Institut der Université Paris 5 in Boulogne-Billancourt.

Cross-modal recognition of shape from hand to eyes in human newborns. Von A. Streri und E. Gentaz in: Somatosensory and Motor Research, Bd. 20, S. 11, 2003

The development of intersensory temporal perception: an epigenetic systems/limitations view. Von D. Lewkowics in: Psychological Bulletin, Bd. 126, S. 281, 2000

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Rückkehr zum Mond

Die Mondforschung erlebt eine Renaissance: Mit ausgefeilter Technik erkunden unbemannte Sonden den Erdtrabanten und fahnden nach Wassereis.

Von Paul D. Spudis

Das erste Ziel irdischer Raumsonden war der Mond. Der kahle und atmosphärenlose Begleiter der Erde ist auch der erste und bislang einzige fremde Himmelskörper, auf den Menschen ihren Fuß setzten. Doch trotz der zahlreichen Erkenntnisse, die diese Besuche erbrachten, grübeln Wissenschaftler noch immer über eine Vielzahl offener Fragen zu seiner Geschichte, seiner Zusammensetzung und seinem Aufbau. Deshalb gibt es neue Ansätze, dem Erdtrabanten seine Geheimnisse zu entreißen.

In den letzten zehn Jahren haben bereits zwei US-Sonden neue Fernerkundungsdaten geliefert. Gegenwärtig ist die Sonde Smart-1 der Europäischen Weltraumagentur Esa zum Mond unterwegs. Weitere Raumfahrzeuge aus verschiedenen Nationen werden folgen. Aus ihren Messdaten erhoffen sich die Forscher neue Erkenntnisse nicht nur über unseren nächsten Nachbarn im All, sondern über alle Planeten des inneren Sonnensystems mit fester Oberfläche – Merkur, Venus, Mars und natürlich die Erde. Da sich die Oberfläche des Mondes seit 3 Milliarden Jahren kaum verändert hat, könnte sie den Schlüssel zum Verständnis der Entstehung und Entwicklung dieser terrestrischen Planeten liefern.

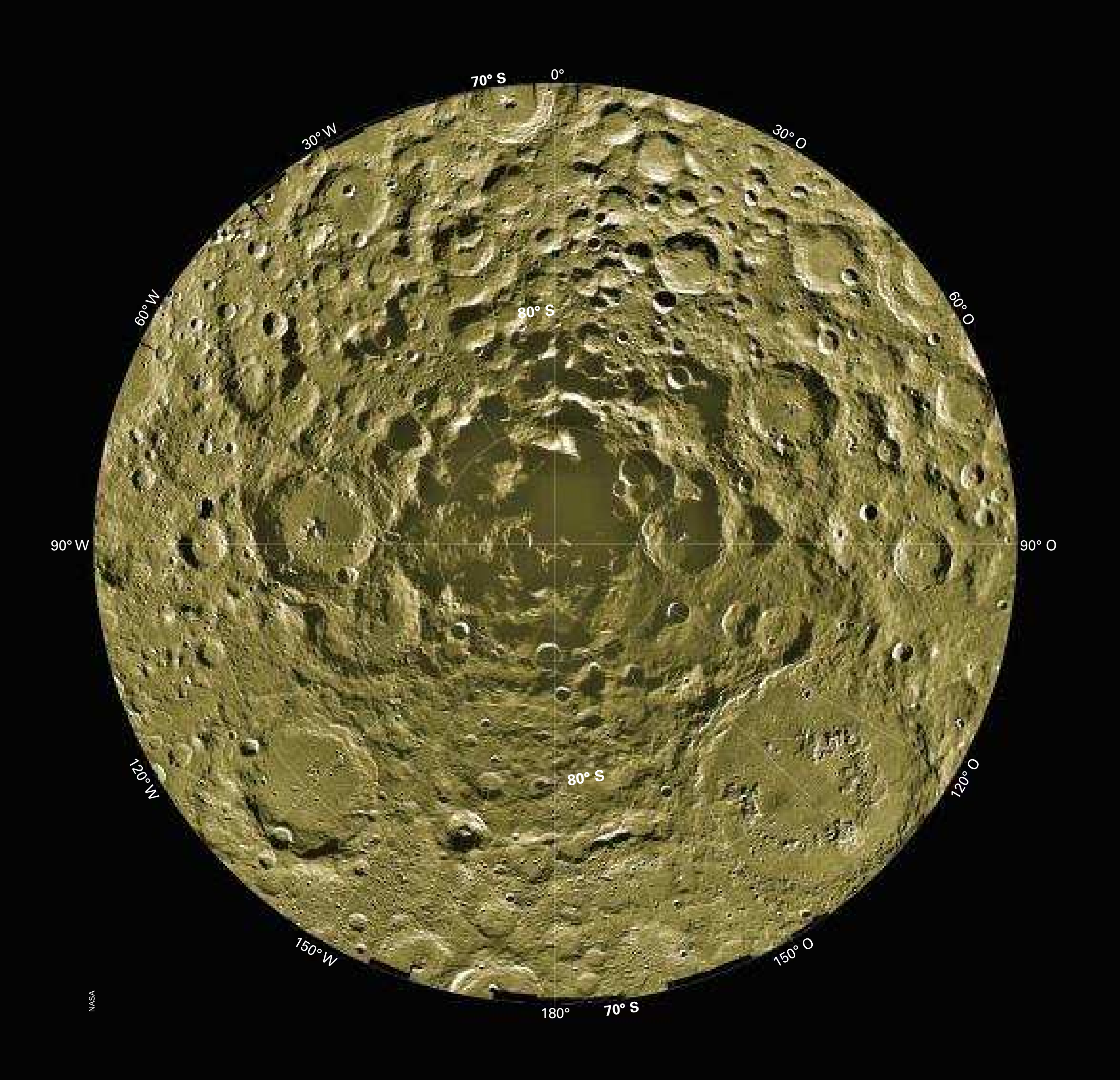
Mittlerweile sind 400 Jahre vergangen, seit Galileo Galilei als erster Astronom den Mond in einem Fernrohr betrachtete. Er erkannte zwei unterschiedliche Arten von Oberflächenregionen: die hellen, zerklüfteten und mit vielen Kratern übersäten Hochländer und die dunklen, flachen, nur wenige Krater zeigenden Tiefländer, die er Maria – lateinisch für Meere – nannte. Als 1959 die sowjetische Sonde Luna 3 erstmals die stets der Erde abgewandte Rückseite des Mondes fotografierte, die noch kein Mensch zuvor erblickt hatte, kam es zu einer der größten Überraschungen des noch jungen Raumfahrtzeitalters: Die Aufnahmen zeigten, dass die dunklen Maria, die doch auf der erdzugewandten Seite des Trabanten so dominierend in Erscheinung treten, auf der Mondrückseite fast vollständig fehlen. Die Wissenschaftler haben zwar inzwischen eine Reihe von Theorien aufgestellt, um diesen Unterschied zu erklären, trotzdem ist dies bis heute eines der großen Rätsel der Mondforschung.

Dramatischer Ursprung

Die Analyse des Mondgesteins, das die Apollo-Astronauten und einige unbemannte Luna-Sonden zur Erde gebracht hatten, lieferte den Forschern einen ersten Einblick in die Entwicklungsgeschichte des Mondes. Offenbar entstand der Erdtrabant vor 4,5 Milliarden Jahren, als ein etwa marsgroßer Himmelskörper mit der noch jungen Erde kollidierte (Spektrum der Wissenschaft 9/1994, S. 58). Der Zusammenprall schleuderte verdampftes Gestein in eine Erdumlaufbahn, wo es binnen kurzem kondensierte und sich zum Mond zusammenlagerte. Dieser Prozess vollzog sich so schnell, dass die in Wärme umgewandelte Gravitationsenergie den äußeren Teil des jungen Mondes aufschmolz – es bildete sich ein den ganzen Erdtrabanten umspannender Ozean aus Magma. Material geringerer Dichte stieg dabei an die Oberfläche dieses Ozeans aus flüssigem Gestein, wo es sich schließlich zu einer Kruste verfestigte.

Auf diese frühe Phase folgte ein schweres Bombardement der Mondoberfläche durch Kometen, Asteroiden und Meteoroide. Durch den Einschlag einiger großer Geschosse entstanden Becken mit Durchmessern von über 2000 Kilometern. Die meisten Einschlagkrater und Becken füllten sich – zumindest auf der erdzugewandten Seite – im Verlauf der nächsten 300 bis 400 Millionen Jahre mit Basaltlava und bildeten so die heute sichtbaren dunklen Maria. Mit der Zeit ließ das Bombardement nach, die Anzahl der Einschläge und die Größe der Geschosse nahmen ab. So erklärt sich, warum die jüngeren Maria weniger und kleinere Krater zeigen als die älteren Hochländer. In den letzten 3 Milliarden Jahren ist dann auf dem Mond nicht mehr viel passiert: Der Vulkanismus war abgeklungen, neue Einschlagkrater entstanden nur noch gelegentlich, hinzu kamen ein permanenter Regen aus Mikrometeoriten – und die Kurzbesuche von zwölf Astronauten in den Jahren von 1969 bis 1972.

Da die Mondoberfläche durch Einschläge, Vulkanismus und tektonische Aktivität geprägt wurde, kann sie als Prüfstein für das Verständnis ▷



Ungewohnte Perspektive: Die Clementine-Sonde lieferte unter anderem eine detaillierte Ansicht der Südpolregion des Mondes. Genau im Zentrum dieses aus 1500 Aufnahmen zusammengesetzten Mosaiks, das vom 70. südlichen Breitengrad begrenzt wird, liegt der Südpol. Sowohl Clementine als auch die Nachfolgersonde Lunar Prospector fanden Hinweise, dass in den permanent im Schatten liegenden Regionen nahe den Polen des Mondes Wassereis existieren könnte.



▷ all dieser Vorgänge dienen. Außerdem ist der Mond auf Grund seiner unmittelbaren Nachbarschaft zur Erde ein ideales Objekt, an dem die Vorgänge in unserer Region des Sonnensystems in seiner frühen Phase erforscht werden können. Während die Spuren von Asteroiden- und Kometeneinschlägen vor Milliarden von Jahren auf der geologisch aktiven Erdoberfläche nahezu vollständig verschwunden sind, blieben sie auf dem Mond erhalten.

Die Wissenschaftler haben durch die Apollo-Expeditionen eine Menge gelernt. Doch viele Rätsel blieben ungelöst, als das Programm nach sechs bemannten Landungen endete. Die beiden Vorbeiflüge der Jupitersonde Galileo am Erde-Mond-System Anfang der 1990er Jahre ließen das Potenzial erahnen, das eine globale Kartierung der Mondoberfläche mit unterschiedlichsten Fernerkundungsinstrumenten bietet: In einem riesigen Becken, das sich auf der Mondrückseite zwischen dem Krater Aitken und dem Südpol erstreckt, und deshalb Südpol-Aitken-Becken genannt wird, entdeckten die Wissenschaftler Anzeichen für einen ungewöhnlich hohen Eisengehalt des Gesteins. Galileo lieferte auch Aufnahmen der Maria in verschiedenen Wellenlängen, woraus die Forscher Rückschlüsse auf die Zusammensetzung der Oberfläche ziehen konnten. Die Galileo-Messungen zeigten, dass sich aus solchen Fernerkundungsdaten vermutlich die zeitliche Abfolge der Lavaflüsse rekonstruieren ließe.

Im Jahr 1994 startete das US-Verteidigungsministerium die Sonde Clementine. Ihre eigentliche Aufgabe war der Test von Sensoren für ein nationales Raketenabwehrsystem – von einer polaren Mondumlaufbahn aus. Clementine umkreiste den Mond 71 Tage lang und lieferte dabei auch Karten der gesamten Oberfläche in elf Wellenlängenbereichen des sichtbaren Lichts und des nahen Infrarots. An Bord der Sonde befand sich zudem ein Laser-Entfernungsmesser, mit dem die Forscher erstmalig die Topografie der Mondoberfläche vollständig vermessen konnten. Ferner lieferte die genaue Analyse der Clementine-Umlaufbahn detaillierte Informationen über das Schwerefeld des Mondes. Und schließlich stießen die Wissenschaftler mit einem improvisierten Radar-Experiment auf Anzeichen für Wassereis in Regionen nahe dem Mond-Südpol, die permanent im Schatten liegen.

Vier Jahre nach Clementine schickte die Nasa innerhalb ihres Discovery-Programms »Lunar Prospector« in eine polare Umlaufbahn um den Mond. Mittels Gammastrahlungs- und Neutronen-Spektroskopie lieferte die Sonde eine komplette Karte der chemischen Zusammensetzung der Mondoberfläche. Das Vorhandensein von Wassereis am lunaren Südpol konnte bestätigt werden, zudem entdeckte Lunar Prospector Eisvorkommen auch am Nordpol. Ein Spektrometer für Alphateilchen maß Ausgasungen aus dem Mondinnern, während ein Magnetometer lokale magnetische Anomalien registrierte. Die genaue Verfolgung der Sondenbahn verbesserte nochmals unsere Kenntnisse über das Gravitationsfeld des Mondes. Am Ende der Mission ließ die Bodenkontrolle die Sonde gezielt am Südpol des Mondes abstürzen – in der Hoffnung, so Wasserdampf freizusetzen. Viele Teleskope waren auf die Absturzstelle gerichtet, aber es wurde keine Dampfwolke entdeckt.

Spurensuche im Gestein

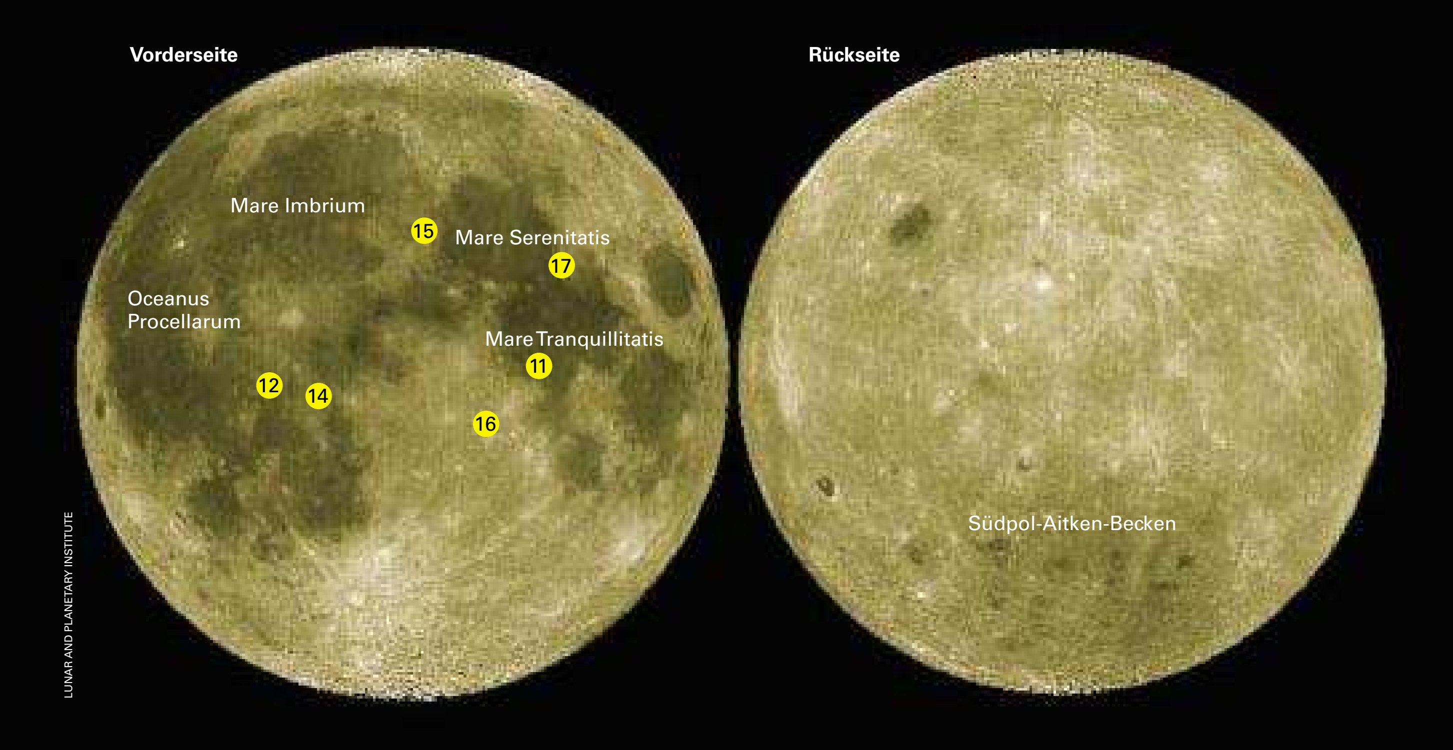
Die Ergebnisse der Clementine- und Lunar-Prospector-Missionen erlaubten es den Forschern, die Entdeckungen der Apollo-Flüge in einen größeren Zusammenhang einzuordnen und ihren Kenntnisstand zu revidieren. Beispielsweise fanden die Astronauten von Apollo 12 und 14 im Oceanus Procellarum, einem ausgedehnten Tiefland im westlichen Teil der erdzugewandten Mondseite, Basaltgestein mit einer anomalen Anreicherung von Spurenelementen. Die Forscher fassen diese Elemente mit der Abkürzung KREEP zusammen – K für Kalium, REE für »rare-earth elements«, also seltene Erden, und P für Phosphor. Geologen bezeichnen diese Spurenelemente als »inkompatibel«, das bedeutet, sie passen nicht recht in die Kristallstruktur der gewöhnlichen Mineralien, aus denen Felsgestein besteht. Das Vorkommen von »KREEP« in den Mondsteinen deutet darauf hin, dass der Mond in seiner Frühzeit Phasen durchlaufen hat, in denen seine Oberfläche immer wieder geschmolzen und ausdifferenziert ist. Während dieses Prozesses konnten sich die inkompatiblen Elemente im ge-

IN KÜRZE

▶ In den 1990er Jahren kartierten die US-Sonden **Clementine** und **Lunar Prospector** Topografie, chemische Zusammensetzung sowie gravitative und magnetische Anomalien des Mondes.

▶ Mit diesen Ergebnissen konnten die Wissenschaftler die Entdeckungen der **Apollo-Missionen** neu bewerten. Doch zugleich wurden neue Fragen aufgeworfen, beispielsweise über Ursache und Umfang des schweren Trümmer-Bombardements des Mondes vor 4 Milliarden Jahren.

▶ Beginnend mit der europäischen Sonde **Smart-1**, die gegenwärtig zum Mond unterwegs ist, werden in den kommenden Jahren weitere unbemannte Raumfahrzeuge aus mehreren Nationen den Mond erforschen, um einige der verbliebenen Rätsel zu lösen.



Die von Clementine gelieferten Bilder der erdzugewandten Seite des Mondes zeigen deutlich die beiden unterschiedlichen Terrainstrukturen: helle, stark verkraterte Hochländer und dunkle, gleichmäßige Tiefländer, die Maria (links; die gelben Kreise markieren die Landestellen der sechs Apollo-Missionen). Im Gegensatz dazu fehlen auf der erdabgewandten Seite des Mondes die Maria fast vollständig. Das Südpol-Aitken-Becken ist die größte Einschlagstruktur im gesamten Sonnensystem.

schmolzenen Teil eines langsam auskristallisierenden Systems anreichern. Die Daten von Lunar Prospector zeigten, dass sich im Oceanus Procellarum die höchsten KREEP-Konzentrationen des ganzen Mondes finden; die Ursache für diese ungewöhnliche Verteilung ist allerdings bis heute nicht geklärt.

Die beiden Mondsonden bestätigten auch, dass die lunaren Hochländer von Anorthosit dominiert werden – Gestein, das hauptsächlich aus Feldspat besteht und reich an Kalzium und Aluminium ist. Diese Felsen sind sehr früh in der Mondgeschichte entstanden, als der äußere Teil des Erdtrabanten noch vollständig geschmolzen war. Anorthosit hat eine geringe Dichte und konnte darum an der Oberfläche des Magmaozeans schwimmen. Auf Grundlage der Apollo-Daten hatten die Mondforscher bereits eine solche Phase der Mondentstehung postuliert, doch der Beweis konnte erst durch Clementine und Lunar Prospector geliefert werden, deren Daten die globale Verteilung und die große Häufigkeit von Anorthosit zeigten. Die einzige mögliche Energiequelle, die in der Lage wäre, den ganzen Mond zu schmelzen, ist die Gravitationsenergie, die frei wird, wenn sich viele kleine Körper zusammenlagern. So bestätigt also die große Häufigkeit von Anorthosit in der Mondkruste die Theorie, der zufolge der Mond aus den Trümmern einer planetarischen Kollision entstanden sei.

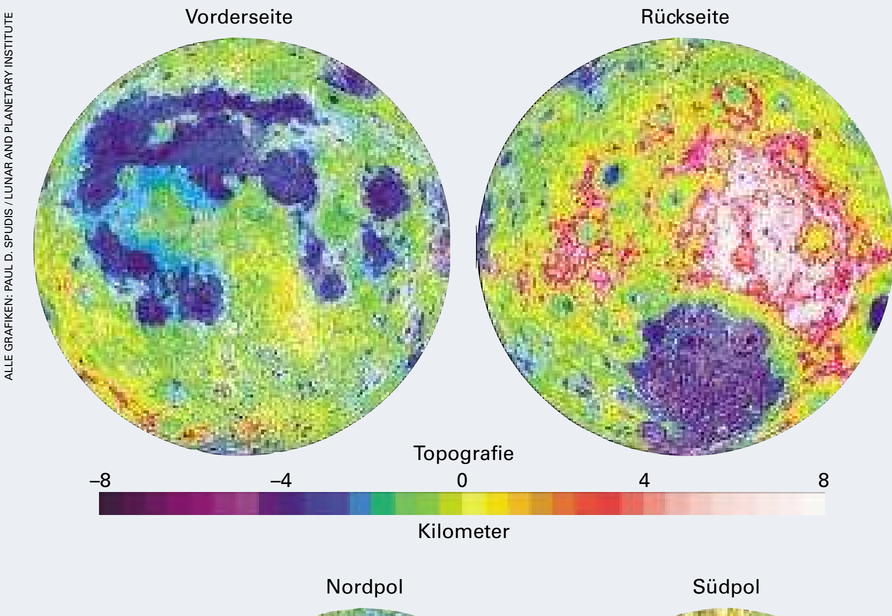
Die Mondsonden fanden auch eine Erklärung für eine zunächst rätselhafte Entdeckung der Apollo-Missionen: Die von den Apollo-11-Astronauten zur Erde gebrachten Basaltbrocken aus dem Mare Tranquillitatis enthalten einen ungewöhnlich hohen Anteil an Titan. Für die Mondgeologen war es schwierig zu erklären, wie Magma mit einem hohen Titananteil und entsprechend hoher Dichte durch die Anorthosit-Kruste mit ihrer niedrigen Dichte nach oben steigen konnte. Die Messungen von Clementine und Lunar Prospector zeigten schließlich, dass der Titananteil im Mare-Basalt zwar über einen gewissen Bereich variiert, doch so extreme Werte wie am ersten Landeplatz im Meer der Ruhe auf der Mondoberfläche nur selten erreicht werden. Eine wertvolle Lektion für die Wissenschaftler: Proben von einem einzigen Ort auf dem Mond müssen nicht repräsentativ für die ganze Oberfläche des Trabanten sein.

Meere aus erstarrter Lava

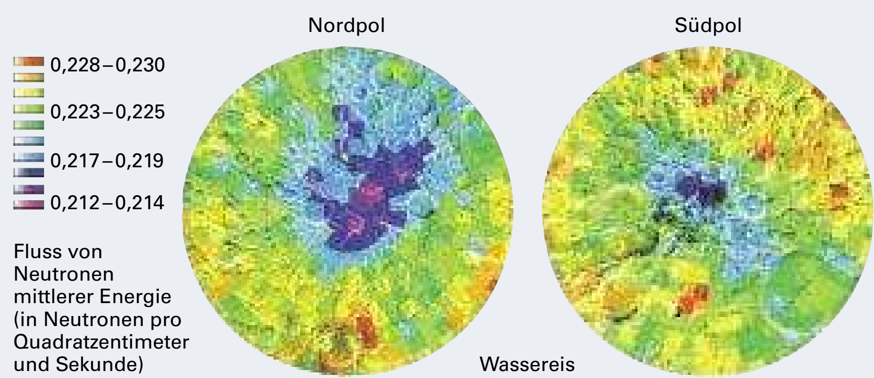
Weil einzelne Lavaflüsse im Allgemeinen eine gleichförmige und von anderen Lavaflüssen unterscheidbare Zusammensetzung aufweisen, können die Wissenschaftler anhand der Daten von Clementine und Lunar Prospector eine detaillierte Magmakarte erstellen. Das Alter der einzelnen Magmaströme lässt sich dann anhand der Kraterhäufigkeit ermitteln. Ältere Lavaflüsse waren dem Bombardement länger ausgesetzt als junge und zeigen deshalb eine größere Anzahl von Einschlagkratern. Aus der Radioisotopen-Analyse der Apollo-Proben konnten die Forscher das Alter der Lavaflüsse an den Apollo-Landestellen genau bestimmen. Mit Hilfe dieser Werte konnten sie dann durch Vergleich der Kraterhäufigkeiten auch das Alter der Lavaflüsse in anderen Regionen abschätzen. Die Ergebnisse zeigen, dass – wenngleich sowohl Zusammensetzung als auch Alter der Ströme stark variieren – die meisten Eruptionen vor 3 bis 3,8 Milliarden Jahren stattfanden.

Zwar erscheinen die Hochländer generell heller als die Maria, doch gibt es auch Regionen, die ein mittleres Reflexionsvermögen zeigen und relativ viel Eisen enthalten. In einigen dieser Fälle scheint es sich um Maria zu handeln, die von Trümmern aus den Hochländern überdeckt sind – Schichten von Gestein, das bei den gewaltigen Einschlägen, welche die großen Becken erzeugt haben, herausgeschleudert wurde. Da die Lavaflüsse dieser Maria älter sein müssen als 3,8 Milliarden Jahre – denn zu dieser Zeit entstanden die Becken –, muss die ▷

Mondkarten



Anhand der Messdaten von Clementine und Lunar Prospector konnte erstmals eine detaillierte topografische Karte des gesamten Mondglobus erstellt werden. Clementine ermittelte mit einem Laser-Entfernungsmesser während jedes Umlaufs einmal pro Sekunde den Abstand zur Mondoberfläche. Die enormen Ausmaße des Südpol-Aitken-Beckens werden in dieser Falschfarbendarstellung deutlich (purpurne Region auf der Mondrückseite). Diese durch einen Einschlag entstandene Struktur hat einen Durchmesser von 2600 Kilometern und ist bis zu 13 Kilometer tief.



Lunar Prospector bestätigte die von Clementine gefundenen Hinweise auf Wassereis an den Polen des Mondes. Das Neutronen-Spektrometer der Sonde registrierte aus den im Dauerschatten liegenden Gebieten weniger Neutronen mittlerer Energie (purpur) als anderswo. Diese Neutronen stammen aus der kosmischen Strahlung; durch Kollision mit Wasserstoffatomen auf der Mondoberfläche werden sie besonders stark abgebremst.

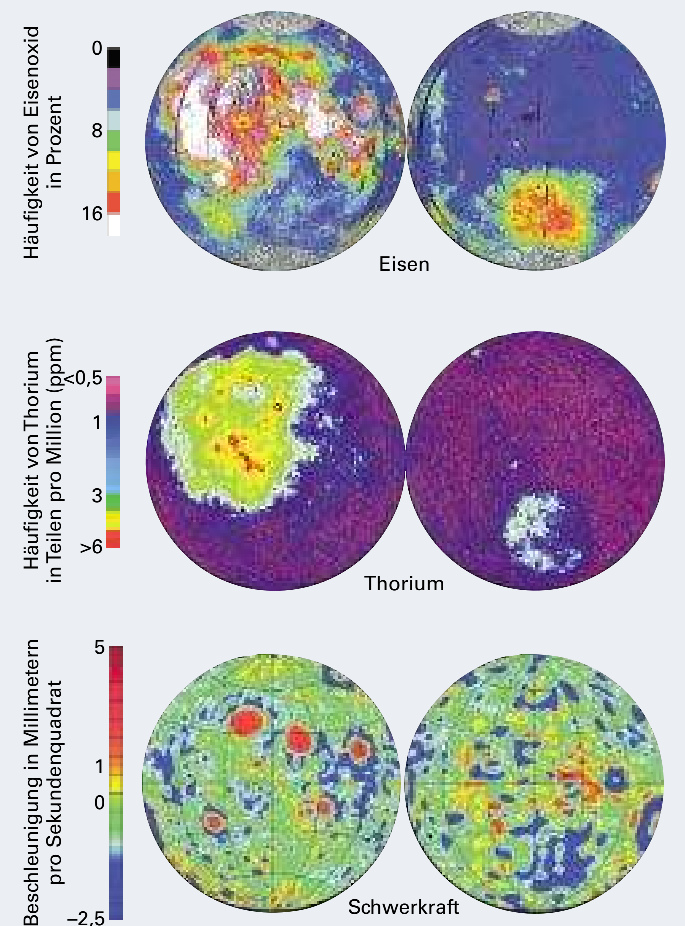
▷ Eruption von Lava auf der Mondoberfläche lange vor der Zeit der ältesten Lavaflüsse begonnen haben, die durch die Proben der Apollo-Missionen belegt sind. Die globale Kartierung hat gezeigt, dass solche uralten Mare auch auf der erdabgewandten Seite des Mondes weit verbreitet sind.

Der Mond ist eine raue, unebene Welt. Der Höhenunterschied zwischen seinem niedrigsten Punkt (im Südpol-Aitken-Becken) und seinem höchsten Punkt (auf dem Ringgebirge um das Koroljow-Becken auf der erdabgewandten Seite) beträgt über 16 Kilometer. Auf der Erde, wo der maximale Höhenunterschied 20 Kilometer beträgt, wird die Topografie der Oberfläche von der Plattentektonik geprägt, die hohe Gebirgsketten und tiefe ozeanische Gräben hervorruft. Im Gegensatz dazu ist die Kruste des Mondes starr – seit mindestens 4 Milliarden Jahren schon. Das topografische Relief des Mondes wurde also ausschließlich durch Einschlagkrater und -becken geformt. Es ist kein Zufall, dass das größte Becken zugleich der Ort der größten Höhenunterschiede ist – überraschend ist lediglich, dass diese alte und große Landschaftsformation noch heute nahezu unverändert ihr ursprüngliches Relief zeigt.

Größter Krater des Sonnensystems

Auch das Innere des Mondes scheint recht ungleichmäßig aufgebaut zu sein. Anhand winziger Frequenzverschiebungen in den Funksignalen des Lunar Prospector, dessen Bahn bis auf sieben Kilometer an die Mondoberfläche heranführte, konnten die Wissenschaftler auf Schwerkraftanomalien schließen. Über den jüngsten Einschlagbecken war die Sonde einer unerwartet starken Anziehungskraft ausgesetzt. Der Mare-Basalt in den Becken sollte nicht die Ursache dieser Schwerkraftanomalien sein. Denn die einzelnen Lavaflüsse sind mit einigen Metern bis einigen Dutzend Metern recht dünn, und selbst die Gesamtdicke der Lavaschicht beträgt typischerweise nur 200 Meter oder weniger. Deshalb glauben die Forscher, dass nach dem Einschlag eine große Menge an Material aus dem Mantel des Mondes Richtung Oberfläche aufgestiegen ist und dort nun als Massenkonzentration die Anomalie verursacht.

Die auffällige Zweiteilung zwischen Vorder- und Rückseite des Mondes lässt sich möglicherweise ebenfalls durch einen unterschiedlichen Aufbau der unter der Oberfläche gelegenen Schichten erklären. Nach heutigem Kenntnisstand ist es am wahrscheinlichsten, dass die Kruste auf der erdzugewandten Seite dünner ist und deshalb aufsteigendes Material leichter durch die Oberfläche brechen kann als auf der erdabgewandten Seite. Das riesige Südpol-Aitken-Becken enthält den größten Teil des Mare-Basalts der Mondrückseite – doch selbst diese Ablagerungen sind sehr dünn und von begrenzter Ausdehnung. Während selbst das kleinste Becken auf der Vorderseite des Mondes mit Lava angefüllt ist, ist



Die Kamera von Clementine lieferte Bilder bei elf unterschiedlichen Wellenlängen (»Farben«) des sichtbaren und des nahen Infrarotbereichs des Spektrums. Mit Hilfe der Daten bei zwei Wellenlängen (750 und 950 Nanometer) konnten die Forscher eine Karte zeichnen, die das Vorkommen von Eisen im Mondboden zeigt. Der Eisenanteil ist am höchsten in den Maria der Vorderseite und am niedrigsten im zentralen Teil der Mondrückseite, oberhalb des Südpol-Aitken-Beckens.

Mit seinem Gamma-Spektrometer konnte Lunar Prospector die Häufigkeit von zehn chemischen Elementen in der Mondkruste messen. Eines dieser Elemente ist Thorium, das sich ähnlich verhält wie die kollektiv als KREEP bezeichneten Spurenelemente: Es fügt sich schlecht in die Kristallstrukturen der meisten Mineralien ein, aus denen das Mondgestein besteht. Der höchste Thoriumanteil findet sich im Oceanus Procellarum auf der Vorderseite des Mondes. Die Ursache für diese ungewöhnliche Verteilung ist bislang unklar.

Da Lunar Prospector sich **bis auf sieben Kilometer** an die Mondoberfläche annäherte, konnte die Sonde sehr genau Schwankungen im Schwerefeld des Mondes untersuchen. Über einigen der jüngsten Einschlagbecken ist die Gravitation erhöht (rote Gebiete). Eine mögliche Erklärung dafür wäre, dass nach dem Einschlag dichteres Material aus dem Mondmantel bis zur Oberfläche aufgestiegen ist.

das Südpol-Aitken-Becken in weiten Bereichen frei von Mare-Lava.

Die mit dem Laser-Messgerät der Clementine-Sonde erzeugte topografische Karte zeigt die erstaunliche Dimension des Südpol-Aitken-Beckens, das mit seinem Durchmesser von 2600 Kilometern der größte Einschlagkrater des gesamten Sonnensystems ist. Clementine stieß bei ihren Messungen auf zahlreiche weitere derartige Strukturen, von denen viele zuvor unbekannt waren. Die Wissenschaftler schätzen nun, dass es auf dem Mond über 45 Becken – definiert als Einschlagstrukturen größer als 300 Kilometer – gibt. Anhand der Anzahl der Krater in ihrem Inneren lassen sich das Südpol-Aitken-Becken als das älteste und Orientale als das jüngste einstufen.

Das absolute Alter ist allerdings nur für jene Becken bekannt, die von den Apollo- oder Luna-Missionen besucht worden sind. Mit Hilfe der Radioisotopen-Methode kann man das Alter der Gesteine, die beim Einschlag geschmolzen sind, feststellen – und damit auch den Zeitpunkt des Einschlags. Demnach sind alle diese Becken vor 3,8 bis 3,9 Milliarden Jahren entstanden. Daraus haben die Forscher den Schluss gezogen, dass der Mond in diesem kurzen Zeitraum eine sehr hohe Einschlagrate (»lunarer Kataklysmus«) erlebt hat.

Was aber könnte die Ursache einer solchen Einschlagwelle gewesen sein? Modelle der Frühzeit des Sonnensystems sagen voraus, dass die Häufigkeit der Einschläge in der Zeit von vor 4,5 Milliarden bis vor 4 Milliarden Jahren zurückgegangen sein sollte, weil die meisten Planetesimale – kleine, felsige Himmelskörper, die sich im Urnebel des Sonnensystems gebildet haben – aus dem inneren Sonnensystem herausgeschleudert oder von den äußeren Planeten eingefangen wurden. Wenn man beweisen könnte, dass es den lunaren Kataklysmus tatsächlich gab, hätte das also enorme Folgen für unsere Vorstellungen von der Geschichte der inneren Planeten. Es ist beispielsweise vorstellbar, dass vor 3,9 Milliarden Jahren ein großer Himmelskörper im Asteroidengürtel zerbrochen ist und seine Trümmer durch das Erde-Mond-System hindurchgefegt sind. Wäre das der Fall, dann wäre die Geschichte der Mondkrater kein guter Leitfaden für die Datierung von Oberflächenstrukturen auf anderen Planeten außer der Erde.

Wassereis an den Polen?

Eine Möglichkeit herauszufinden, ob es wirklich einen lunaren Kataklysmus gab, wäre die Bestimmung des absoluten Alters des Südpol-Aitken-Beckens. Denn dieses Gebilde muss älter sein als alle anderen – das älteste bislang anhand von Gesteinsproben datierte ist das Mare Serenitatis mit einem Alter von 3,87 Milliarden Jahren. Da der Einschlag im Südpol-Aitken-Becken erst nach der Verfestigung der Mondkruste vor 4,3 Milliarden Jahren stattfand, muss das Alter des Beckens zwischen diesen beiden Daten liegen – aber wo genau? ▷

▷ Wenn das Alter des Südpol-Aitken-Beckens am unteren Ende dieser Zeitspanne liegt, so wäre dies ein starkes Argument für den lunaren Kataklysmus. Liegt das Alter hingegen näher bei 4,3 Milliarden Jahren, so bestünde keine Notwendigkeit mehr, ein solches Ereignis anzunehmen – die Kratergeschichte des Mondes wäre vielmehr mit einem exponentiellen Absinken der Einschlaghäufigkeit in Einklang zu bringen. In diesem Fall könnte die Verkraterung des Mondes tatsächlich dabei helfen, die Verkraterung der anderen Planeten, wie etwa des Mars, zu interpretieren. Um das Südpol-Aitken-Becken zu datieren, brauchen die Forscher jedoch Gesteinsproben aus dieser Region.

Das wohl aufregendste Ergebnis von Clementine und Lunar Prospector waren die Hinweise auf Wassereis an den Polen des Mondes. Da die Rotationsachse des Mondes nur um 1,5 Grad geneigt ist und somit fast senkrecht zur Erdbahnebene steht, befindet sich die Sonne, von den Mondpolen aus betrachtet, stets unmittelbar am Horizont. Dadurch ist ein Ort, der sich mindestens 600 Meter über dem Durchschnittsniveau der Mondoberfläche befindet, permanent dem Sonnenschein ausgesetzt. Umgekehrt befindet sich jeder Punkt, der mindestens 600 Meter unter dem Durchschnittsniveau liegt, im ewigen Schatten. In diesen Regionen ist die einzige Energiequelle der geringe Anteil an radioaktiver Strahlung aus dem Mondinnern und die kosmische Strahlung. Die Forscher haben abgeschätzt, dass in diesen dunklen Regionen – die bereits seit 2 bis 3 Milliarden Jahren existieren – Temperaturen von –223 bis –203 Grad Celsius herrschen. In diesen Kältefallen könnte sich Wassereis angesammelt haben, das von Kometen und Meteoriten zum Mond gebracht wurde, denn das Eis könnte dort niemals durch Sonnenlicht zum Verdampfen gebracht werden.

Smart-1 und andere smarte Sonden

Clementine hatte zwar kein spezielles Instrument an Bord, um nach polarem Eis zu suchen, doch den Missionsspezialisten gelang es, mit Hilfe des Senders der Sonde ein Experiment zu improvisieren. Während nämlich eine felsige Oberfläche Radiowellen streut, absorbiert Eis einen Teil der Strahlung und reflektiert den Rest kohärent. Als Clementine Radiowellen in die permanent im Schatten liegenden Regionen am Südpol des Mondes schickte, waren die reflektierten Signale typisch für eine vereiste Oberfläche. Vier Jahre später wies das Neutronen-Spektrometer des Lunar Prospector große Mengen an Wasserstoff in den dunklen Regionen an beiden Polen nach – die wahrscheinlichste Erklärung dafür ist, dass es sich um Wasserstoff in Molekülen von gefrorenem Wasser handelt. Schätzungsweise befinden sich in den oberen dreißig Zentimetern der Mondoberfläche an beiden Polen insgesamt über 10 Milliarden Tonnen Wasser. Allerdings wissen die Forscher bislang nichts über den physikalischen Zustand, die genaue Zusammensetzung und die Reinheit des Eises – und auch nicht, ob dieses Eis leicht zugänglich ist. Dieses Wissen können uns erst künftige Missionen liefern.

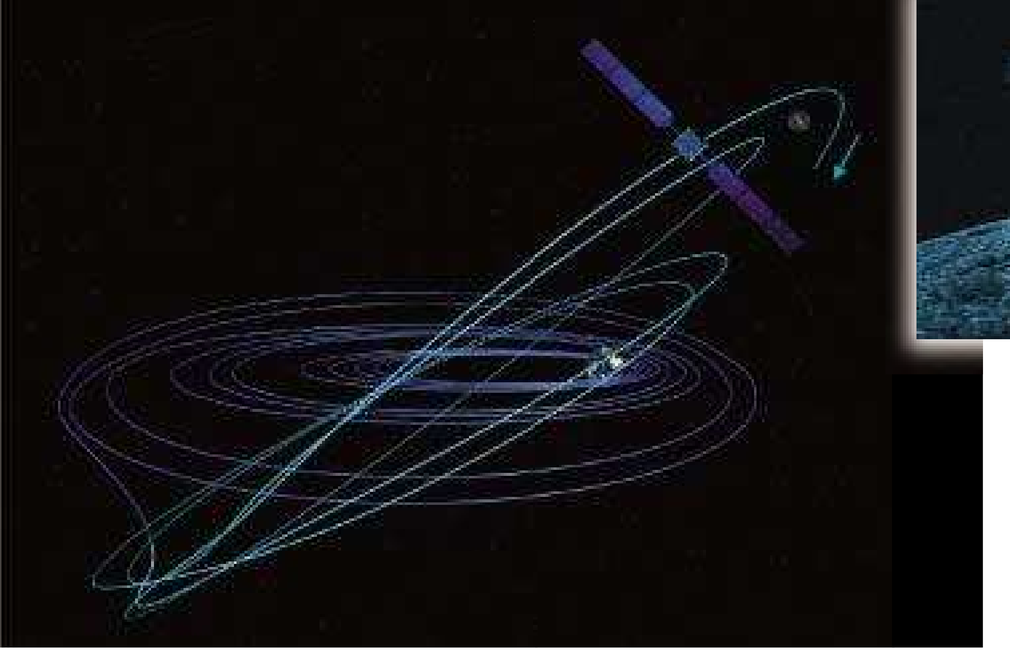
Die von Clementine übermittelten Fotos zeigten auch, dass einige polnahe Regionen fast ununterbrochen im Sonnenlicht liegen. Ein Beispiel dafür ist der Rand des Kraters Shackleton, der während drei Viertel des Mondtages beleuchtet ist. Solche Regionen weisen eine relativ »gutartige« thermische Umwelt auf. Im Gegensatz zu den üblichen Temperaturschwankungen von –150 bis +100 Grad Celsius variieren die Werte hier nur von –60 bis –40 Grad. Für den Aufbau einer unbemannten oder bemannten Station in einer dieser sonnenreichen Regionen wären die Anforderungen an die Stabilität der Ausrüstung gegen Temperaturschwankungen erheblich verringert. Und wenn sich in einer nahe gelegenen, permanent dunklen Region zudem Eis abbauen ließe, könnte daraus Wasser für die Lebenserhaltungssysteme und Wasserstoff und Sauerstoff für Raketentreibstoff gewonnen werden.

Der Erfolg der Flüge von Clementine und Lunar Prospector hat zu einer Renaissance der Mondforschung geführt:

Auch Europa ist auf dem Weg zum Mond

Das Wiederaufflammen des wissenschaftlichen Interesses hat die Raumfahrtbehörden verschiedener Nationen dazu inspiriert, neue Missionen zum Mond zu planen.

Sonde	Land	Startdatum	Masse ohne Treibstoff in Kilogramm	Forschungsziele
Aktuelle und künftige Missionen				
Smart-1	Europa (Esa)	27. September 2003	280	Nach dem Einschwenken in eine Mondumlaufbahn Anfang 2005 soll die Sonde mit einer Kamera und einem Spektrometer die mineralogische Beschaffenheit der Mondoberfläche kartieren und in den dunklen Kratern nach Eis suchen.
Lunar A	Japan	August/September 2004	520	Der Orbiter soll zwei Penetratoren abwerfen, die sich an entgegengesetzt liegenden Stellen in den Mond bohren. Sie sind mit Seismometern und Wärmefluss-Sensoren ausgestattet, mit denen die Forscher das Innere des Mondes untersuchen wollen.
Selene	Japan	2005	1600	Eine breite Palette an Kameras, Spektrometern und anderen Instrumenten soll die Zusammensetzung der Mondoberfläche, die Topografie, die Schwerkraft und das Magnetfeld in hoher Auflösung kartieren.
South Pole–Aitken Basin Sample Return	USA	vor 2010	noch nicht festgelegt	Ein automatisches Landegerät soll Bodenproben und Gesteinsbrocken einsammeln und zur Analyse zur Erde bringen. Daraus erhoffen sich die Wissenschaftler Rückschlüsse auf das Alter des Südpol-Aitken-Beckens.



BEIDE BILDER: ESA / MEDIALAB

◀ **Smart-1 nimmt einen ungewöhnlichen Kurs: Mittels eines neuartigen Ionenantriebs schraubt sich die Esa-Sonde langsam zum Erdtrabanten vor (links). Ein Infrarotspektrometer wird die Mondoberfläche auf Wassereis untersuchen.**

Mehrere Mondsonden sind gegenwärtig in verschiedenen Phasen der Entwicklung und Vorbereitung. Im September 2003 startete die Esa-Sonde Smart-1. Ihre Hauptaufgabe ist zwar der Test eines Ionenantriebs während ihres 16-monatigen Flugs zum Mond, aber die Sonde ist auch mit einer Kamera und einem Röntgendetektor ausgestattet, mit dem sie nach der Ankunft in der Mondumlaufbahn die Oberfläche des Erdtrabanten untersuchen soll. Japan plant für 2004 den Start von Lunar A, einem Orbiter, der zwei so genannte Penetratoren in die Mondoberfläche schießen soll. Ausgestattet mit Seismometern und Wärmefluss-Sensoren sollen die Sonden Informationen über das Innere des Mondes liefern – vielleicht sogar eine Karte des Mondkerns. Ein Jahr später soll der größere japanische Orbiter »Selene« folgen, der die Mondoberfläche mit einer Weitwinkelkamera, einem Laser-Höhenmessgerät, einem Radargerät sowie Röntgen- und Gammaspektrometern kartieren soll.

Die große Bedeutung des Südpol-Aitken-Beckens für die Mondforschung hat die Wissenschaftler auch auf die Idee gebracht, eine robotische Sonde dort niedergehen zu lassen, die Gesteinsproben einsammeln und dann zur Erde bringen soll. Das wichtigste Ziel eines solchen Vorhabens wäre es, Proben der Einschlagschmelze zu erhalten. Aus dieser Schmelze ließe sich dann ablesen, wann das Becken entstanden ist, und so der lunare Kataklysmus beweisen oder widerlegen. Da es sich bei der Einschlagschmelze um ein Gemisch aller Gesteine handelt, die von dem herabstürzenden Asteroiden oder Kometen getroffen wurden, ließe sich daraus zudem Aufbau und Zusammensetzung der Mondkruste in der Becken-Region ermitteln. Einige Forscher vermuten sogar, dass der einschlagende Körper die Mondkruste durchschlagen und so Material des oberen Mantels herausgeworfen hat, das möglicherweise aus Tiefen von bis zu 120 Kilometern stammt. In diesem Fall könnten die Gesteinsproben sogar Rückschlüsse auf die Zusammensetzung tieferer Schichten des Mondes liefern.

Eine Sample-Return-Mission in das Südpol-Aitken-Becken ist zwar vom Konzept her einfach, doch schwer durchzuführen. Zunächst müssen die Planer anhand von Fernerkundungsdaten eine gute Landestelle auswählen, an der sich passende Gesteinsproben entnehmen lassen, mit deren Hilfe die Fragen nach Alter und Zusammensetzung des Becken beantwortet werden können. Da die Landestellen auf der Rückseite des Mondes liegen, müsste der Lander entweder vollständig autonom handeln oder über einen Relaissatelliten in der Mondumlaufbahn Kontakt zur Bodenkontrolle halten.

Wasser und Politik entscheiden über eine Mondbasis

Die Sonde müsste sowohl Gesteinsbrocken einsammeln als auch Bodenproben entnehmen. Die Gesteinsbrocken dienen der mineralogischen Untersuchung und der Bestimmung des Alters. Die Bodenproben dagegen zeigen den Forschern, ob die Gesteinsbrocken tatsächlich repräsentativ für die Region sind. Zudem können sie Fragmente seltener und exotischer Gesteinstypen enthalten. Die eingesammelten Proben müssen dann in ein kleines Rückkehrmodul verfrachtet werden, das mit einem eigenen Raketenmotor startet, zur Erde zurückfliegt und dort nach bewährter Manier landet. All diese Anforderungen machen das Vorhaben aufwendig und zu einer technischen Herausforderung, aber es ist durchaus im Rahmen unserer heutigen Möglichkeiten.

Werden eines Tages vielleicht sogar wieder Astronauten den Mond besuchen? Es gäbe eine Vielzahl von wissenschaftlichen Gründen dafür. Und das Vorhandensein von Wassereis könnte es erheblich einfacher machen, eine dauerhafte menschliche Präsenz auf dem Mond zu etablieren. Doch die Rückkehr von Astronauten erfordert letztlich eine politische Entscheidung – die nur dann getroffen wird, wenn eine bemannte Mondmission ein nationales oder internationales Anliegen ist. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



Paul D. Spudis ist Geologe und Mitarbeiter des Applied Physics Laboratory der Johns-Hopkins-Universität in Baltimore (Maryland). Zuvor war er in der Astrogeologie-Abteilung des US Geological Surveys tätig und hat sich im Rahmen des Planetary Geology Program des Nasa Office of Space Science auf die Erforschung der Einschlagprozesse und des Vulkanismus auf Planeten spezialisiert. Während seiner Zeit am Lunar and Planetary Institute in Houston (Texas) war er stellvertretender Leiter des Wissenschaftlerteams der 1994 vom US-Verteidigungsministerium durchgeführten Clementine-Mission.

Monde. Missionen zu neuen Welten. Sterne und Weltraum Special 7, Heidelberg 2002

The Clementine atlas of the moon. Von D. Ben J. Bussey und Paul D. Spudis. Cambridge University Press, 2004

The once and future moon. Von Paul D. Spudis. Smithsonian Institution Press, 1996

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

AXYNTEC DÜNNSCHICHTTECHNIK GMBH

Schneller Schichtwechsel

Rapid Protocoating beschleunigt die Produktentwicklung.

Von Bernhard Gerl

Sie sind nur wenige Mikrometer dick, bestimmen aber oft die Brauchbarkeit von Produkten: Dünne Schichten modifizieren und ergänzen die Eigenschaften der Werkstoffe, auf die sie aufgebracht werden. Sie verleihen Schneidwerkzeugen aus Stahl die erforderliche Härte für den Einsatz in der Metallverarbeitung, optimieren die Reflektivität spiegelnder Oberflächen und schützen die Oberflächen von Titanimplantaten. Doch die bestmögliche Beschichtung zu finden erfordert im Allgemeinen langwierige Experimentierreihen. Im Bereich der Medizintechnik gehen dabei zwei bis fünf Jahre ins Land, die Beschichtung kann bis zur Hälfte der Entwicklungskosten eines Implantats ausmachen.

Ein Grund dafür: Die dabei eingesetzten Anlagen nutzen meist die Techniken der Abscheidung aus der Dampfphase (*physical vapour deposition*, PVD, siehe Kasten) und sind für die Serienfertigung ausgelegt. Die Beschichtungsparameter lassen sich an solchen Maschinen nur aufwendig und unwirtschaftlich variieren, zudem behindern jegliche Experimente Serienfertigungen. Sollen gar neuartige Schichtstrukturen aus drei bis sechs verschiedenen Elementen erzeugt werden, überfordert dies das konventionelle PVD-Verfahren – dabei wären zu viele Prozessparameter zu kontrollieren.

Laserpulse steuern Schichtaufbau

Hochschulen setzen deshalb seit vielen Jahren die gepulste Laserablation (*pulsed laser deposition*, PLD, siehe Kasten) zur Erforschung und Entwicklung dünner Schichten aus Keramiken, Metallen oder Halbleitern ein. Dem Augsburger Unternehmen AxynTeC Dünnschichttechnik, das seinen Ursprung im Institut für Physik der Universität Augsburg hat, gelang es im vergangenen Jahr erstmals, diese Technik in ein industrietaugliches System umzusetzen. Erste Erfahrungen liegen inzwischen aus der Medizintechnik vor. Weil Ingenieure damit ein Schichtensystem bis zu fünfzig Prozent schneller entwickeln und testen können, sprechen die Firmengründer vom »Rapid Protocoating«.



AXYNTEC DÜNNSCHICHTTECHNIK GMBH

▲ **Titan, das für Hüftprothesen verwendet wird, ist nicht biokompatibel. Erst eine sich von allein bildende Titandioxidschicht sorgt dafür, dass das Implantat nicht vom Gewebe abgestoßen wird (links ein solches Produkt). Diese Schicht kann jedoch durch Reibung leicht zerstört werden. Weit haltbarer sind Implantate, die mit einer strapazierfähigen Keramikschicht überzogen wurden (rechts).**

Bei der Laserablation erhitzt der gepulste Hochleistungsstrahl eines Excimer-Lasers die Oberfläche des Materials im Bereich einiger zehn bis hundert Nanometer so stark, dass sie »explosionsartig« verdampft. Die abgetragenen Moleküle und Cluster fliegen, teils ionisiert, durch ein Hochvakuum zum Bauteil und schlagen sich dort nieder. Wie viel Material abgelöst wird, steuert der Ingenieur durch die Zahl der Laserpulse und ihre Energiedichte. Auf diese Weise kann er den Schichtaufbau sehr genau steuern. Anders als beim herkömmlichen Verdampfen bleibt die Zusammensetzung des Beschichtungsmaterials unverändert (siehe Kasten).

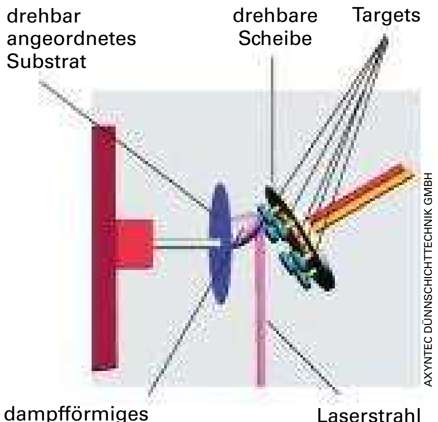
In der von AxynTeC vorgestellten Anlage sind mehrere Targets – der Fachausdruck für das Ausgangsmaterial, das durch die Beschichtungsquelle, also durch Ionen, Elektronen, Photonen, in die Gasphase überführt wird – auf einer drehbaren Scheibe befestigt. Dadurch ist es möglich, unterschiedlichste Materialien Lage für Lage abwechselnd aufzubringen oder auch Gradientensysteme zu realisieren, bei denen sich die chemische Zusammensetzung mit zunehmender Schichtdicke ändert. In reinen Entwicklungsanlagen lassen sich auch dünne Folien als Targets verwenden, die nur einen Bruchteil der sonst üblichen Materialträger kosten.

Für erste Tests wird meist ein Standardsubstrat, etwa Silizium, beschichtet. Die darauf abgeschiedene Schicht kann dann einfach auf ihre mechanischen, chemischen und optischen Eigenschaften geprüft werden. Ist eine geeignete Materialklasse gefunden, wird ihre Zusam-

mensetzung variiert. Im nächsten Schritt beschichten die Ingenieure das Originalmaterial oder -werkstück. Bis in einer Serienanlage ein Musterbauteil beschichtet ist, dauert es zwei bis vier Stunden. Die Prototypbeschichtung dauert für einen vergleichbaren Prozess nur etwa 15 bis 30 Minuten.

Das Spektrum der möglichen Schichtwerkstoffe reicht von komplexen Oxidkeramiken wie Hochtemperatursupraleitern, elektro- oder magnetooptischen Materialien über Halbleiter und Edelmetalle bis hin zu einigen Polymeren. Fluorpolymere wie Teflon von DuPont lassen sich sogar nur durch Laserablation in dünnen Schichten abscheiden, da konventionelle Verfahren die langen Molekülketten zerstören. ◁

Bernhard Gerl ist Physiker und arbeitet als Fachautor in Regensburg.



Soll eine Beschichtung aus verschiedenen Materialien (Targets) bestehen, werden diese auf einer Scheibe befestigt und dann nacheinander in den Strahlengang des Lasers gedreht.

Verdampfen, Sputtern, Lasern

Mit physikalischen Verfahren ultradünne Schichten herstellen

Dünne Schichten sind wenige Nanometer bis einige Mikrometer dick. Damit sie ihre jeweilige Funktion erfüllen können, müssen sie sich in der gewünschten Zusammensetzung auf der zu beschichtenden Oberfläche abscheiden. Um Verunreinigungen zu vermeiden, findet dieser Prozess im Vakuum bei Drücken von 10^{-6} bis 10^{-1} Millibar statt; die Prozessparameter werden abhängig vom Material gewählt, das zu beschichten ist. Das aufzutragende Material ist meist zunächst fest, das aber durch physikalische Prozesse in die Dampfphase übergeführt wird, zum Substrat fliegt und sich dort niederschlägt.

Beim thermischen Verdampfen wird dazu ein Schiffchen genanntes Behältnis mit dem Targetmaterial durch starke elektrische Ströme erhitzt. Das Substrat befindet sich oberhalb. Ein Problem dieser einfachen Anordnung: Bei komplex zusammengesetzten Stoffen verdampfen manche Komponenten früher als andere.

Das in der Industrie am häufigsten eingesetzte Verfahren ist das Sputtern beziehungsweise Zerstäuben. Ein elektrisches Feld beschleunigt Ionen, meist von Argon oder Sauerstoff, ein magnetisches Feld richtet ihre Bahn auf das Target. Dort schlagen sie die gewünschten Teilchen heraus. Weil die Ionen mit den Targetmolekülen wechselwirken, lösen sich manche davon leichter als andere.

Bei der gepulsten Laserablation trifft der Strahl eines hochenergetischen UV-Lasers den Beschichtungswerkstoff in kurzen Intervallen von zwanzig bis vierzig Nanosekunden; pro Puls werden 800 bis 1200 Millijoule übertragen. Auf Grund der kurzen Wellenlänge dringt er nur wenige hundert Nanometer tief ein. Das Material wird dann lokal und in Sekundenbruchteilen weit über die Siedepunkte der Einzelbestandteile erhitzt. Es verdampft explosionsartig, das frei werdende Gas reißt noch gebundene Stoffe mit. Verschiedene Siedepunkte spielen bei diesem Prozess keine Rolle mehr, die chemische Zusammensetzung des Dampfes entspricht dem des Targets. Der Dampf nimmt zudem fast die gesamte Energie des Laserpulses auf, sodass sich das restliche Target kaum erwärmt.

Preziosen im DNA-Schrott

In scheinbar nutzlosen Teilen der Erbsubstanz verbirgt sich verblüffenderweise eine hochkomplexe Informationsebene: »Nur-RNA-Gene«. Um sie geht es im ersten Artikel dieser zweiteiligen Serie über das unbekannte Genom.

Von W. Wayt Gibbs

Manchmal ist es gut, aus dem Fahrwasser zu geraten. Vor etwa zwanzig Jahren erkannten Astronomen irritiert, dass die Massen der beobachtbaren Galaxien nicht mit der Dynamik von Galaxienhaufen und der großräumigen Struktur des Universums in Einklang zu bringen sind. Nach und nach wurde ihnen klar, dass das Universum nicht so leer sein konnte, wie es erschien, ja dass sogar der größte Teil der Gesamtmasse in unserem Kosmos offenbar unsichtbar war. Woraus diese »Dunkle Materie« besteht und auf welche Weise sie die sichtbaren Himmelskörper beeinflusst, vermochte niemand zu sagen, aber den Beobachtungen nach musste sie existieren. Ohne fest etablierte Theorien zu verändern oder sogar umzustoßen, war die Dunkle Materie – ebenso die später entdeckte Dunkle Energie – nicht zu verstehen. Gerade dadurch erhielten jedoch Astrophysik und Kosmologie neue, wichtige Impulse.

Eine ähnliche Entwicklung zeichnet sich inzwischen in der Molekulargenetik ab. 2003 feierten die Biowissenschaften den fünfzigsten Jahrestag der Strukturaufklärung der DNA-Doppelhelix, und die Forscher des Human-Genomprojekts veröffentlichten »vorläufige Endversionen« der kompletten menschlichen DNA-Sequenz. Es schien, als hätte man der Erbsubstanz DNA ihre großen Geheimnisse bereits entrissen. Mehr und mehr aber offenbaren sich Phänomene, die mit den herkömmlichen Theorien nicht zu erklären sind.

Nach konventioneller Sichtweise sind für vererbbare Merkmale und somit für den »Plan des Lebens« praktisch nur die Bereiche der DNA relevant, die Bauanweisungen für Proteine tragen. Dem widerspricht inzwischen eine Fülle neuer Erkenntnisse in Fachzeitschriften und auf Kongressen: Ähnlich wie Dunkle Materie das Schicksal der Galaxien mitbestimmt, beeinflussen »dunkle Bereiche« des Erbguts Entwicklung und Erscheinungsbild aller Organismen – bis hin zum Menschen. Das Genom beherbergt also wesentlich mehr Mitspieler als nur die traditionellen Gene. ▷



▶ **Kleine dunkelbraune Flecken auf der Iris können verräterische Anzeichen für das Wirken des »Dunklen Genoms« sein. Manche körperlichen Merkmale sind nicht durch übliche Gensequenzen bestimmt, sondern durch chemische Modifikationen der Chromosomen. Reguliert werden diese reversiblen Abwandlungen unter anderem von kurzen Stückchen des vermeintlichen »Schrotts« in der Erbsubstanz DNA. Bestimmte Merkmale tauchen daher in manchen Zellen auf, in anderen jedoch nicht.**

JAMIE KRIPKE



▷ Welches Ausmaß »die dunkle Seite des Genoms« erreicht, ist derzeit noch unklar – nur so viel: Neben den Genen konventioneller Art existieren mindestens zwei weitere Informationsebenen. Die eine zieht sich durch die riesigen Bereiche »nichtcodierender« DNA-Sequenzen, die zwischen und innerhalb von Genen liegen. Diese Abschnitte wurden lange als irrelevant abgeschrieben, ja als Schrott bezeichnet. Allerdings sind viele »intergenische« Regionen über Abermillionen Jahre weitgehend unverändert erhalten geblieben, was die Vermutung nahe legt, dass ihnen irgendeine wichtige Rolle zukommt. Tatsächlich erstellt die Zelle von etlichen sogar Abschriften in Form spezieller RNAs. Mehr noch: Diese DNA-ähnlichen Moleküle haben eine weitaus größere Vielfalt von Funktionen, als die Biologen sich je vorgestellt haben. Manche Wissenschaftler vermuten, dass vieles von dem, was die Individualität einer Person oder die Besonderheit einer Organismenart ausmacht, auf Variationen jener Preziosen beruht, die sich im »DNA-Schrott« verbergen.

Vorsicht Dogma

Eine weitere, wesentlich veränderlichere Informationsebene findet sich über dem Niveau der DNA-Sequenzen: »Epigenetische« Phänomene – griechisch *»epi«* bedeutet auf, nach oder dazu – basieren auf komplexen Verbänden von Proteinen und niedermolekularen Verbindungen, die sich der DNA anheften, sie umhüllen und stützen. Die zu Grunde liegenden Mechanismen erscheinen bislang noch mysteriös; die verschlüsselten Informationen sind kryptisch und werden anders als die der Gene immer wieder neu geschrieben und gelöscht. Wie Mutationen im Erbgut sind auch epigenetische Fehler offenbar an der Entstehung vieler Missbildungen, Krebsleiden und anderer Erkrankungen beteiligt. Anders als die genetischen Fehler lassen sie sich jedoch möglicherweise mit Medikamenten rückgängig machen. Entsprechende experimentelle Therapieformen werden derzeit bei Leukämiepatienten getestet.

Inzwischen seien viele Wissenschaftler überzeugt, dass so ungefähr alle denkbaren Regelmechanismen im Genom auch tatsächlich realisiert sind, berichtet Carmen Sapienza von der Temple Universität in Philadelphia. Der Entwicklungsgenetiker arbeitete bereits an epigenetischen Phänomenen, als man diese noch für exotische Ausnahmen hielt (siehe seinen Artikel in Spektrum der Wissenschaft 12/1990, S. 82). »Möglicherweise sind hier sogar noch neue fundamentale Mechanismen zu entdecken«, hofft Sapienza. »Ich denke, dass die spannendste Ära in der Geschichte der Genetik gerade erst begonnen hat.«

Nach Meinung der Forscher wird es Jahre, vielleicht Jahrzehnte dauern, bis eine schlüssige Theorie erklären kann, wie DNA, RNA und die epigenetische Maschinerie in einem komplexen selbstregulierenden System zusammenarbeiten. Auf jeden Fall aber müssen neue Theorien das zentrale Dogma ablösen, auf dem seit fünfzig Jahren die molekulare Genetik und schließlich auch die Biotechnologie basiert. In seiner gängigen Form lautet es schlicht: DNA erzeugt RNA, RNA erzeugt Protein – und Proteine erledigen praktisch alle relevanten Aufgaben in der Biologie. Die Informationen hierfür sind in den gewundenen strickleiterförmigen DNA-Doppelsträngen der Chromosomen gespeichert, und zwar in der Abfolge der vier DNA-Basen: Adenin, Thymin, Guanin und Cytosin. Diese »genetischen Buchstaben« bilden jeweils paarweise eine Leitersprosse: A klinkt in T ein, G in C – und jeweils umgekehrt. Ein Gen ist die auf einer Seite der Leiter abzulesende Folge von Basen, die für ein Protein codiert.

Proteine entstehen in einem vierstufigen Prozess. Zunächst heftet sich ein Enzym an einen Strang der DNA und schreibt die Basenfolge in Form einer einzelsträngigen RNA ab. Danach werden so genannte Introns – nichtcodierende Bereiche dieser Primärabschrift – herausgeschnitten und die codierenden Teile zur Boten-RNA vereint. Diese ist die eigentliche Arbeitskopie des Gens. Sie verlässt den Zellkern und erreicht die molekularen Synthesemaschinen, an denen die Basensequenz in eine Abfolge von Aminosäuren – sprich von Proteinbausteinen – übersetzt wird. Die neu entstandene Aminosäurekette faltet, schlingt und windet sich; dadurch entsteht die charakteristische dreidimensionale Form des fertigen Proteins.

Der alte Genbegriff schafft nur Verwirrung

Eben diese räumliche Faltung macht Proteine zu so bemerkenswert vielseitigen Molekülen. Einige bilden beispielsweise Muskelfasern, andere sorgen für komplexe Organstrukturen und viele arbeiten als Enzyme, die biochemische Reaktionen katalysieren, Nährstoffe umsetzen oder Signale übermitteln. Wieder andere steuern Genfunktionen, indem sie an spezielle Bereiche der DNA oder später der RNA andocken. Es ist also kaum verwunderlich, dass viele Biologen und daher auch Journalisten das zentrale Dogma so interpretierten, als könne eine DNA-Sequenz – bis auf ganz wenige Ausnahmen – nur dann ein Gen sein, wenn sie für ein gewöhnlich funktionsfähiges Protein codiert.

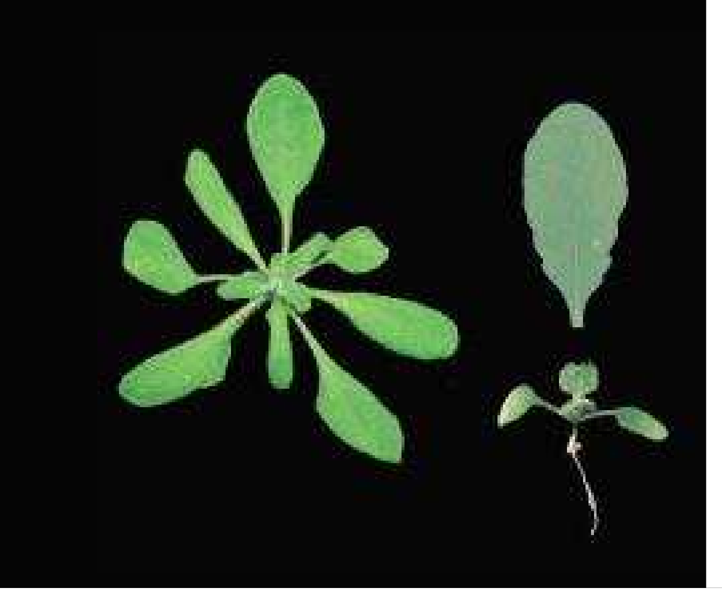
»Wer sagt, das menschliche Genom enthalte etwa 27 000 Gene, meint damit solche für Proteine«, bemerkt Michel Georges, Genetiker an der Universität von Liège in Belgien. Auch wenn dies erst eine vorläufige Zahl ist – aktuelle Schätzungen liegen zwischen 20 000 und 40 000 Genen – bestätigt sie wohl jetzt schon eines: Die Anzahl wächst nicht zwangsläufig mit der Komplexität einer Spezies. »Taufliegen besitzen weniger solcher Gene als Fadenwürmer – und Reispflanzen mehr als der Mensch«, erläutert John S. Mattick, Direktor des Instituts für Biowissenschaften an der Universität von Queensland in Brisbane (Australi-

IN KÜRZE

► Die **Genetik** hat sich lange auf den winzigen Bruchteil des Erbguts konzentriert, der Bauanweisungen für Proteine trägt. Die übrige Erbsubstanz, beim Menschen **etwa 98 Prozent**, wurde oft als **»Schrott-DNA«** abqualifiziert. Die Entdeckung aber, dass viele bisher verborgene Gene ihre Wirkung nicht über Proteine, sondern über RNAs entfalten, hat diese Auffassung widerlegt.

► **Gene, die nur RNA ausprägen**, sind meist klein und schwierig zu identifizieren. Einige von ihnen spielen jedoch eine bedeutende Rolle für die Gesundheit und die Entwicklung von Pflanzen und Tieren.

► Aktive Formen der RNA regulieren zudem **eine separate »epigenetische« Informationsebene** mit, die zwar innerhalb der Chromosomen, jedoch außerhalb der eigentlichen DNA-Sequenz zu suchen ist.





MIT FREUNDLICHER GENEHMIGUNG DURCH JAVIER F. PALATNIK ET AL. IN NATURE, BD. 425, 18. SEPTEMBER 2003, S. 257

Wenn winzige, unkonventionelle Gene nicht mehr greifen, kann das Erscheinungsbild und der Gesundheitszustand eines Organismus erheblich leiden. Die Ackerschmalwand beispielsweise trägt normalerweise löffelförmige flache Blätter (links). Wird eine ihrer so genannten mikroRNAs – produziert von einem Nur-RNA-Gen – am Wirken gehindert, entwickelt die Pflanze auffällige Fehlbildungen (rechts). Diese mikroRNA steuert offenbar die Aktivität einiger wichtiger Gene auf RNA-Ebene.

en). »Die Menge an nichtcodierender DNA hingegen scheint sehr wohl mit der Komplexität zu wachsen.«

In höheren Organismen, also auch beim Menschen, »sind die proteincodierenden Abschnitte der Gene von teilweise ausgedehnten nichtcodierenden Strecken unterbrochen«, erläutert Mattick. So ausgedehnt, dass der Anteil proteincodierender Sequenzen in den menschlichen Chromosomen nicht einmal zwei Prozent beträgt. Etwa drei Milliarden Basenpaare, die wir im einfachen Chromosomensatz praktisch jeder unserer Zellen mit uns tragen, müssen aus irgendwelchen anderen Gründen vorhanden sein. Zunächst wurden die Einschübe in den Genen und die endlosen Strecken zwischen den Genen einfach als »evolutionärer Sperrmüll« eingestuft – ein offensichtlich vorschnelles Urteil.

»Mehr und mehr stellt sich heraus, dass eine große Zahl von ›Genen‹ existiert, die eindeutig funktionell aktiv sind, obwohl sie für kein Protein codieren«, sondern nur für RNA, sagt Georges. Der Begriff des »Gens« war zwar schon immer etwas unscharf definiert. Auch kannte man schon lange Gene, die für bestimmte Formen von RNA codieren – etwa für Transfer-RNAs, die Aminosäuren zu den Proteinfabriken schleppen. Mit den neuen »Nur-RNA-Genen« wird der Begriff jedoch noch verwaschener. »Um Unklarheiten zu vermeiden«, erläutert Claes Wahlestedt vom schwedischen Karolinska Institut, »verwenden wir den Begriff des Gens möglichst gar nicht mehr: wir nennen jeden DNA-Abschnitt, der [in RNA abgeschrieben, also] transkribiert wird, eine Transkriptionseinheit.«

Nach detaillierter Analyse des Mäuse-Genoms »schätzen wir die Zahl solcher Einheiten auf etwa 70 000 bis 100 000«, erklärte Wahlestedt auf dem International Congress of Genetics im Juli letzten Jahres in Melbourne. »Bei etwa der Hälfte könnte es sich um Transkriptionseinheiten handeln, die für keine Proteine codieren.« Sollte sich diese Schätzung bewahrheiten, so käme auf jedes proteincodierende Gen ein anderes, das in Form aktiver RNAs ausgeprägt wird, die nicht einfach Arbeitskopien für die Proteinsynthese sind, sondern Zellfunktionen direkt beeinflussen.

Was für Mäuse gilt, trifft vermutlich auch auf andere Tierarten und den Menschen zu. Eine Arbeitsgruppe am Nationalen Institut für Humangenomforschung in Bethesda (Maryland) hat vor kurzem das Erbgut von Mensch, Rind, Hund, Schwein, Ratte und sieben anderen Spezies auszugsweise verglichen. Die computergestützte Analyse erbrachte 1194 Abschnitte, die bei mehreren Arten praktisch ohne wesentliche Veränderung erhalten geblieben sind – ein starker Hinweis darauf, dass diese konservierten Sequenzen zur »evolutionären Fitness« der Arten beitragen. Zur Überraschung aller lagen aber nur 244 dieser Segmente innerhalb proteincodierender Bereiche. Die Mehrzahl – etwa zwei Drittel – fand sich in Introns, die übrigen verteilt im »DNA-Schrott« der intergenischen Regionen.

Analog gegen digital

Die Situation »dürfte sich zu einem der klassischen Fälle mausern, in denen die objektive Analyse an orthodoxen Wahrheiten scheiterte – und dies immerhin für ein Vierteljahrhundert«, betont Mattick. »Die Zusammenhänge wurden einfach nicht in ihrer vollen Tragweite erkannt – vor allem die Möglichkeit, dass zwischengeschaltete nichtcodierende Sequenzen parallele Informationen in Form von RNA-Molekülen beisteuern. Dies dürfte wohl eine der größten Fehlentwicklungen in der Geschichte der Molekularbiologie gewesen sein.«

Nachdem die Biologen ihre Aufmerksamkeit nun wieder vermehrt der RNA-Welt zuwenden, sind sie erstaunt und beeindruckt zugleich, zu welch vielfältigen biochemischen Kunststücken diese Moleküle im Stande sind. Wie Proteine interagieren RNAs mit ihresgleichen, mit DNA, mit Proteinen und sogar mit niedermolekularen Substanzen. Eiweißstoffe sind »analog arbeitende« Moleküle: Sie erkennen ihre Zielstrukturen ungefähr wie ein Schlüssel das passende Schloss. »Dagegen ist das Schöne an der RNA, dass sie eine spezifische Sequenz besitzt und digital arbeitet, ähnlich wie eine Postleitzahl«, erläutert Mattick. Trifft ein Stück RNA in der Zelle auf eine komplementäre DNA oder RNA, lagern sich beide zu einem Doppelstrang zusammen. Komplementär heißt, der eine Strang ist eine Art Negativ des anderen, sodass jede Base eine ihr ▷

zusagende Partnerin als Gegenüber bekommt.

Ein Beispiel für die erstaunlichen Fähigkeiten von RNAs sind Pseudogene – anscheinend defekte Kopien funktionell aktiver Gene. Im Humangenom fanden sich fast gleich viele Pseudogene wie intakte Gene. Seit Jahrzehnten galten sie als molekulare Fossilien, von Mutationen zerstört und von der Evolution aufgegeben. Im Mai letzten Jahres jedoch berichtete eine Gruppe Genetiker um Shinji Hirotsune von der Medizinischen Hochschule Saitama (Japan) über die Entdeckung des ersten Pseudogens mit biologischer Funktion.

Hirotsune übertrug ein Gen namens *sex-lethal* aus der Taufliege *Drosophila* in das Erbgut von Mäusen. Die meisten Tiere lebten mit dem fremden Gen, das sich an zufällig verteilten Stellen eingenistet hatte, ganz normal. Nur in einer Zuchtlinie geschah das, was der Name des Gens vermuten ließ: Die Mäuse starben fast alle bereits ganz jung. Wie die nähere Analyse ergab, hatte sich der Fremdling im Bereich eines Pseudogens namens *Makorin1-p1* integriert. Dabei handelt es sich um eine stark verkürzte Kopie von *Makorin1*, einem evolutionär alten Gen, das Mäuse mit Taufliegen, Fadenwürmern und vielen anderen Spezies gemeinsam haben. Die Aufgabe der Urversion ist nicht bekannt – wohl aber, dass Mäuse auch eine größere Anzahl davon abgeleiteter Pseudogene besitzen, die alle außer Stande sind, funktionsfähige Proteine zu erzeugen. Wenn jedoch Pseudogene funktionslos sind – weshalb sterben die Mäuse dann, wenn eines davon beeinträchtigt wird?

Vermutlich wird die Boten-RNA von *Makorin1* – so Hirotsunes Team – in Abwesenheit der RNA des Pseudogens *p1* instabil. Im Endeffekt ist das so, als hätte man die Aktivität des Proteingens heruntergefahren. Kurzum: Das Pseudogen steuert über seine RNA die Ausprägung des »echten« Gens, obwohl es auf einem anderen Chromosom liegt. Somit hat es eine ganz reale Funktion – von »Pseudo« kann keine Rede sein.

Zur Zeit lässt sich nur schwer sagen, wie viele Pseudogene biologisch aktive RNA produzieren. Doch existieren noch genügend andere potenzielle Quellen für aktive RNA in den dunklen Regionen des Genoms, sogar in den Proteingenen selbst. So steht die Bauanweisung für ein Protein gewöhnlich auf der einen Seite der DNA-Leiter; die Gegenseite – das Negativ – dient als Matrize, an der das »RNA-Positiv« entsteht: eine künftige Boten-RNA. In einigen Fällen aber nimmt die Synthesemaschinerie den Originalstrang als Vorlage. Das Resultat: eine so genannte »Antisense«-RNA mit komplementärer Sequenz zur »sinnvollen«, codierenden RNA (englisch *sense RNA* genannt). Treffen beide aufeinander, formieren sie sich zu einem Doppelstrang, was die Proteinsynthese behindert (siehe obere Grafik im Kasten rechts).

Erstaunlich wirksame Zensurinstanz

Zwar war schon einige Zeit bekannt, dass Bakterien und Pflanzen Antisense-RNAs produzieren, doch dachten die meisten Genetiker, dies sei bei Säugetieren selten der Fall. Sie wurden im letzten Jahr eines Besseren belehrt – durch Galit Rotman und ihre Kollegen bei der Gentechnologiefirma CompuGen in Tel Aviv (Israel). Bei der Durchmusterung von Sequenzdaten des Humangenoms stieß das Team auf mindestens 1600 Gene, wo Antisense-RNA erzeugt wird. Wahrscheinlich sind es noch wesentlich mehr.

Diese antagonistischen RNAs könnten ein Gen einfach dadurch zum Schweigen bringen, dass sie seine Boten-RNA abfangen. Rotman vermutet jedoch, dass dies über die so genannte RNA-Interferenz-Maschinerie geschieht, eine Art zelluläre Zensurinstanz. Dieser erstaunlich wirksame Mechanismus dient zur selektiven Unterdrückung einzelner Gene und wurde erst vor einigen Jahren entdeckt. Taucht in der Zelle eine doppelsträngige RNA auf, so wird sie von speziellen Enzyme in Stücke geschnitten und in ihre beiden Stränge getrennt. Einer der dabei entstandenen kurzen Einzelstränge wird dann dazu verwendet, andere Boten-RNAs mit komplementärer Sequenz aufzuspüren und zu zerstören. Ursprünglich dient das Zensursystem dem Schutz vor Viren, deren genetische Information häufig, zumindest partiell, als doppelsträngige RNA vorliegt. Es bietet aber auch Forschern eine praktische Möglichkeit, einzelne Gene willkürlich abzuschalten (siehe »Zensur in der Zelle«, Spektrum der Wissenschaft 10/2003, S. 52).

Weder Pseudogene noch Antisense-RNA können jedoch die Missbildungen an Blättern erklären, die Detlef Weigel und seine Mitarbeiter vom Max-Planck-

Genetik im Vorwärtsgang

Seit Entwicklung der Gentechnologie lief ein Großteil der Genforschung quasi rückwärts. Die »reverse« Genetik beginnt mit einem bereits isolierten Gen, das die Forscher im Labor manipulieren und dann in Zellkulturen oder Testorganismen einbringen, um herauszufinden, wie sich die Veränderung auswirkt. Es handelt sich um einen klassisch reduktionistischen Ansatz, der sehr effektiv sein kann.

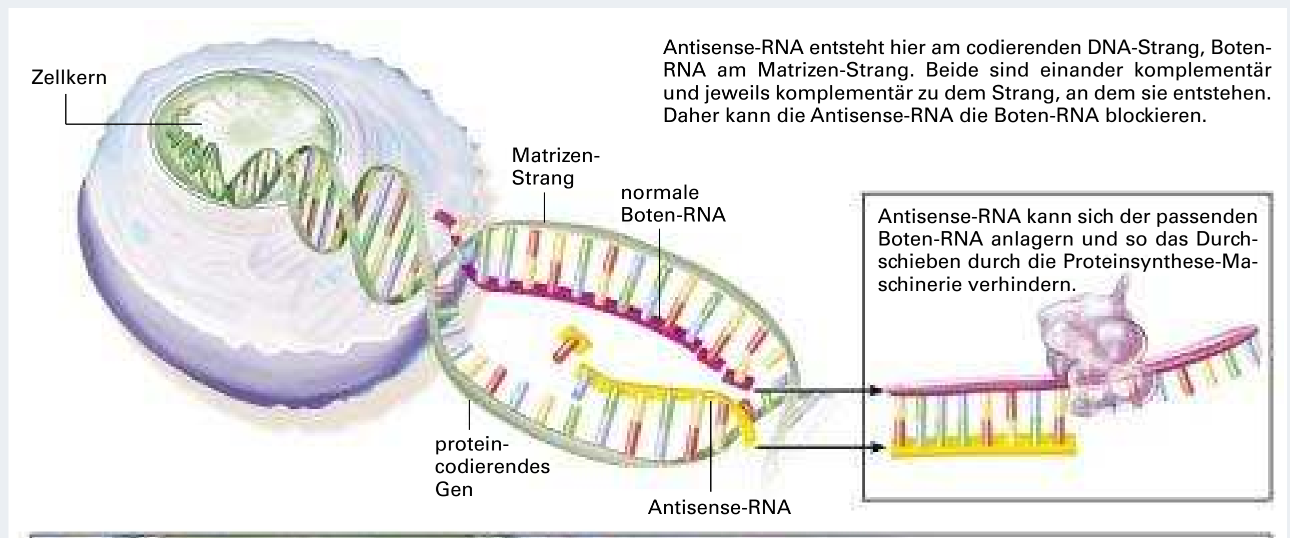
Die zunehmende Entdeckung von verborgenen Genen aber – funktionellen Sequenzen, die fälschlicherweise als DNA-Schrott abqualifiziert wurden – illustriert ein zentrales Problem der reversen Genetik: Sie kann eine Art Tunnelblick aufzwingen. Eine Reihe von Forschern hat sich daher wieder dem älteren Ansatz der »vorwärts gerichteten« Genetik zugewandt, um unbekannte konventionelle wie unkonventionelle Gene zu identifizieren.

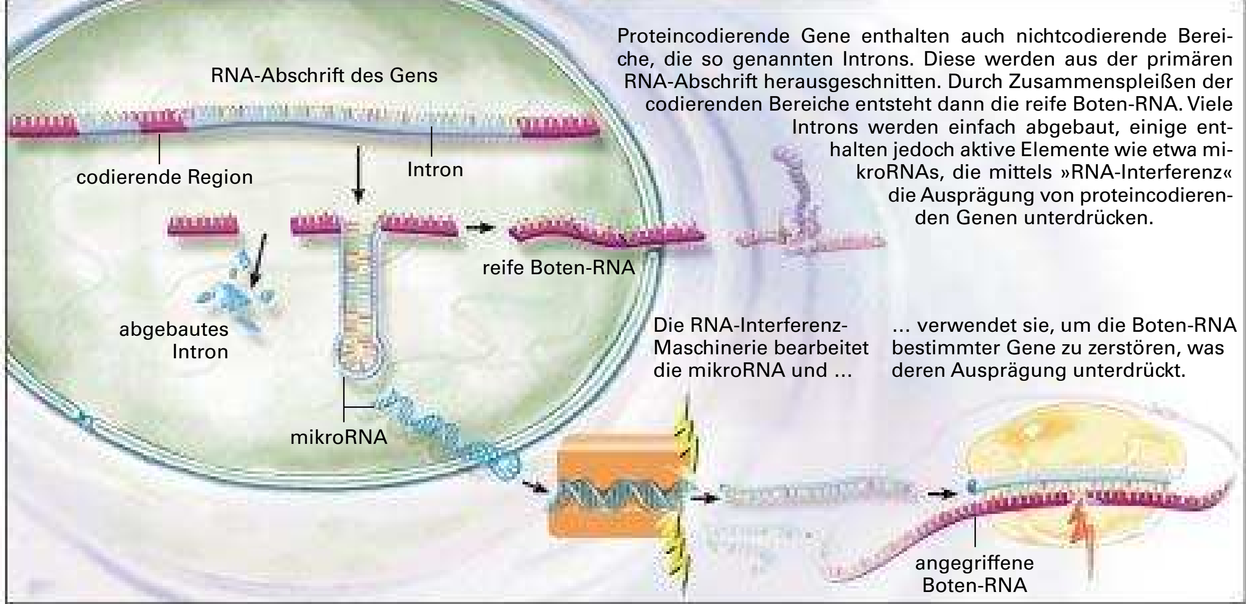
Kommerziell tut dies beispielsweise Phenomix – eine Biotechnologiefirma in La Jolla (Kalifornien), 2002 von mehreren Genetikerteams gegründet. In einer Art Fließbandproduktion werden mutierende Mäuse erzeugt. Die Mutationen treffen zufällig ausgewählte Stellen des Genoms. Einige inaktivieren daher klassische proteincodierende Gene, andere hingegen verborgene Gene, die lediglich aktive RNAs produzieren.

Die Forscher bei Phenomix arbeiten sowohl mit gesunden Mäusen als auch mit Tieren, die an Pendants zu Diabetes, Asthma, Arthritis und Parkinson-Krankheit leiden. Genetiker identifizieren dann die Mutationen, die entsprechende Krankheitssymptome entweder hervorrufen oder lindern. Ob dies letztlich auch zu besseren Therapiemöglichkeiten verhilft, bleibt abzuwarten. Doch die Vorwärtsgenetik hat bereits interessante genetische Phänomene aufgedeckt, die kaum jemand für möglich gehalten hätte – wie etwa ein Pseudogen mit biologischer Funktion, ausgeübt nicht über ein Protein, sondern über eine RNA.

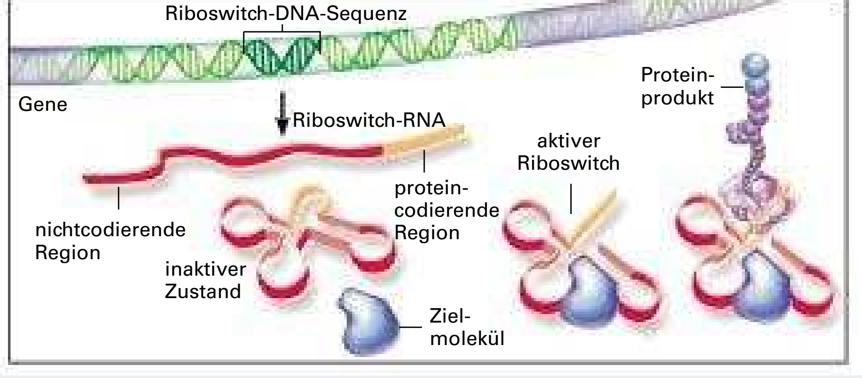
Ein Zoo voll unkonventioneller Gene

Gene sind nach klassischer Auffassung DNA-Abschnitte, die mehrheitlich für funktionsfähige Proteine codieren. Solche DNA-Sequenzen stellen jedoch nur etwa zwei Prozent des menschlichen Genoms. Der Rest besteht aus »nichtcodierender« DNA – die sich jedoch inzwischen als keineswegs nutzlos erwiesen hat. Mehr und mehr »Nur-RNA-Gene« tauchen auf, an denen RNAs – Ribonucleinsäuren – mit einer erstaunlichen Vielfalt von Funktionen abgeschrieben werden – darunter auch solche, die konventionelle Gene »stumm schalten« oder regulieren.





Die vor kurzem entdeckten Riboswitches sind RNAs, die als hochpräzise Genschalter dienen. Oft entstehen sie an »Schrott-DNA«, die weite Strecken zwischen bekannten Genen ausmacht. Die Moleküle falten sich zu komplizierten Gebilden. Ein Abschnitt kann ein Zielprotein oder eine niedermolekulare Substanz binden, der andere codiert für ein eigenes Protein. Nur nach der Bindung schaltet sich der Riboswitch »ein«, wird aktiv und lässt sein Protein entstehen.



TERESE WINSLOW

▷ Institut für Entwicklungsbiologie in Tübingen bei der Ackerschmalwand beobachteten. Dieses Pflänzchen aus der Familie der Kreuzblütler hat normalerweise glatte, löffelförmige Blätter. Wie Weigel und seine Gruppe im September 2003 in »Nature« publizierten, ist die leicht geschwungene symmetrische Blattform zum Teil auf die Aktivität einer so genannten mikroRNA zurückzuführen.

An der Schwelle zu einer Wissensexplosion

Erstmals beschrieben wurden mikroRNAs vor einigen Jahren bei Fadenwürmern. Es handelt sich dabei um kurze nichtcodierende RNAs, die sich haarnadelartig auf sich selbst zurückfalten. Die mikroRNA »JAW« der Ackerschmalwand wird von ihrem Zensursystem wegen der Haarnadelform als Doppelstrang-RNA interpretiert. Das Molekül stammt jedoch nicht aus einem Virus, sondern ist komplementär zu einer Reihe von proteincodierenden Genen, die Form und Größe der Blätter kontrollieren. Mit ihm kann die zelleigene Zensur daher die Expression dieser Gene weitgehend zurückfahren, indem sie einen Großteil der zugehörigen Boten-RNA-Moleküle zerschneidet (siehe Mitte des Kastens Seite 73). Das kleine Nur-RNA-Gen dient somit als Hauptschieberegler, über den sich die »Lautstärke« einer Gruppe wichtiger proteincodierender Gene anpassen lässt. Wenn diese mikroRNA nicht mehr funktionierte, sahen die Pflanzen krank und auffallend deformiert aus (siehe Foto Seite 71).

In den wenigen Jahren, seit Forscher sich ernsthaft für solche Effekte interessieren, wurden Hunderte von mikroRNAs identifiziert, davon mehr als 150 allein beim Menschen. Offenbar handelt es sich um einen lange etablierten Mechanismus der Genregulation. Etwa die Hälfte der beim Menschen nachgewiesenen mikroRNAs kommt in praktisch identischer Form auch beim Kugelfisch vor, obwohl die beiden Spezies seit 400 Millionen Jahren evolutionär getrennte Wege gehen.

Welche Aufgabe die microRNAs beim Menschen erfüllen, ist noch unklar. Sie könnten aber unter anderem eine wichtige Rolle bei der Entwicklung des Gehirns spielen, vermutet Anna M. Krichevsky von der Harvard Medical School in Cambridge (Massachusetts). Ihre Arbeitsgruppe maß in Nervenzellen sich entwickelnder Mäuse die Konzentration von 44 verschiedenen mikroRNAs, und zwar anhand eines »Genchips«. Das Ergebnis: Mindestens neun davon unterliegen während des Gehirnwachstums präzise regulierten Schwankungen. Der Zusammenhang zwischen Hirnentwicklung und mikroRNAs ist zwar bislang nur indirekt belegt. Doch wie Diya Banerjee von der Yale-Universität in New Haven (Connecticut) in einem Übersichtsartikel 2003 bemerkte, »sieht es so aus, als stünden wir an der Schwelle zu einer explosionsartigen Zunahme des Wissens auf diesem Gebiet«.

Proteine mögen zwar die Arbeitstiere der Zelle sein, aber aktive RNAs führen immerhin gelegentlich die Zügel. Allerdings können einige RNAs auch Sklavenarbeit übernehmen: Als Katalysator, Signalgeber und Schaltrelais haben sie sich als ebenso kompetent wie Proteine erwiesen. Bei der Erforschung von Erbkrankheiten musste so mancher Lehrgeld zahlen, weil er bei seiner engagierten Suche nach einem mutierten Protein eine aktive RNA übersah.

Ein Beispiel: Rund neun Jahre lang versuchten Mediziner, das Gen für die Knorpel-Haar-Hypoplasie (englisch abgekürzt: CHH) dingfest zu machen. Diese rezessiv vererbte Erkrankung wurde zunächst bei Mitgliedern der Amish-Sekte entdeckt. Etwa jeder zwanzigste Angehörige dieser isoliert lebenden Gemeinschaft trägt eine defekte Form des Gens, die eine sonst seltene Art von Zwergwuchs verursachen kann. CHH-Patienten haben zudem ein hohes Risiko, an Krebs und Immunstörungen zu erkranken. Der finnische Genetiker Maaret Ridanpää von der Universität Helsinki hatte zwar festgestellt, dass das gesuchte Gen irgendwo innerhalb einer recht ausgedehnten DNA-Region von Chromosom 9 liegen musste. Als er aber den Bereich sequenzierte und dann alle zehn darin gefundenen proteincodierenden Gene überprüfte, war keines mit der Erkrankung assoziiert.

Erst im Jahr 2001 bekam Ridanpää mit seinen Mitarbeitern den »Täter« zu fassen: *RMRP* – so das Kürzel des neuen Gens – produziert kein Protein. Seine sich faltende RNA bildet vielmehr zusammen mit Proteinen, die von anderen Genen codiert werden, ein Enzym. Benötigt wird dieses von den Mitochondrien, den Kraftwerken der Zelle. Eine einzige veränderte Base in der Täter-RNA macht den Unterschied zwischen einem Leben als gesunder Mensch normaler Größe und dem eines Zwergwüchsigen mit reduzierter Lebenserwartung. Als nicht dominante Mutation kommt sie allerdings nur zum Tragen, wenn beide Exemplare von Chromosom 9 betroffen sind. Ähnliche »analoge« RNAs, die sich wie Proteine in komplexer Weise räumlich falten, sind auch für die Funktion der Enzyme unentbehrlich, welche die Enden der Chromosomen vor Abbau schützen. Wieder andere RNA-Enzym-Komplexe geleiten Proteine, die zum Export aus der Zelle bestimmt sind, zu den entsprechenden Schleusen.

Die vielleicht faszinierendsten der neu entdeckten RNAs sind die »Ri-





HUGH MORGAN

Diese Mäusegeschwister einer stark ingezüchteten Linie tragen praktisch identische DNA-Sequenzen – trotzdem variiert ihre Fellfarbe von goldgelb bis mahagonibraun. Die Ursache sind Abweichungen in so genannten epigenetischen Modifikationen eines DNA-Abschnitts, der außerhalb bekannter Gene liegt. Mit herkömmlichen Vererbungstheorien ist die Fellfarbe dieser Tiere nicht vorherzusagen.

boswitches«, 2002 im Labor von Ronald R. Breaker in Yale isoliert. Er und andere Forscher hatten sich gefragt, wie die ersten Vorläufer zellulären Lebens vor Jahrmilliarden in einer reinen RNA-Welt zurechtkamen, in der es noch keine DNA und keine Proteine gab. Sie vermuteten, solche Protoorganismen müssten RNAs als Sensoren und Schalter verwendet haben, um auf Veränderungen der Umweltbedingungen und des Stoffwechsels reagieren zu können. Um diese Hypothese zu testen, versuchten sie solch einen Schalter künstlich zu konstruieren.

Komplexität aus Schrott

»Uns gelang es tatsächlich, einige synthetische RNA-Schalter herzustellen«, erzählt Breaker. Die als Riboswitches bezeichneten langen RNAs bestehen aus einem proteincodierenden und einem nichtcodierenden Anteil. In die korrekte räumliche Struktur gefaltet, bildet der nichtcodierende »Schwanz« einen empfindlichen Sensor, der ein bestimmtes Zielmolekül erkennt. Bei Kontakt mit der richtigen Substanz wird der Schalter regelrecht umgelegt und so das andere, das codierende Ende freigelegt – erst jetzt kann es als Vorlage für die Herstellung seines Proteins verwendet werden. Der Riboswitch ist also eine proteincodierende RNA, die nur in Gegenwart eines Auslösermoleküls funktioniert.

Breakers Team suchte auch nach natürlichen Riboswitches. In den intergenischen Regionen der DNA wurde es fündig – und das bei Lebewesen aus drei Organismenreichen. »Dies bedeutet«, erläutert Breaker, »dass wahrscheinlich schon der letzte gemeinsame Vorläufer solche Schalter besessen hat. Das war noch in der Frühzeit des Lebens.«

Bei dem verbreiteten »Heubazillus« *Bacillus subtilis* reguliert eine Familie von Riboswitches die Expression von immerhin 26 Genen, wie Breakers Gruppe im August 2003 vermeldete. Dabei handelt es sich nicht etwa um exotische Gene, die nur in außergewöhnlichen Situationen aktiviert werden, sondern um ganz alltägliche: Das Bakterium benötigt sie für fundamentale Stoffwechselwege, die unter anderem Schwefel und Aminosäuren betreffen. Breaker schätzt, dass mindestens 68 Gene – etwa 2 Prozent des Bakterien-Genoms, über Riboswitches reguliert werden. Seine Arbeitsgruppe hat bereits begonnen, die digital-analogen Hybridmoleküle für nutzbringende Aufgaben umzukonstruieren, etwa zum selektiven Abtöten von Krankheitserregern.

Je mehr neuartige aktive RNA-Gene aus den lange vernachlässigten Dunklen Bereichen des Erbguts ans Licht gelangen, desto deutlicher wird, dass die Wissenschaft noch längst nicht das komplette genetische Rüstzeug höherer Organismen einschließlich des Menschen kennt. Anders als proteincodierende Gene, die als Kennzeichen definierte Start- und Stopp-Signale tragen, weichen die neuen Nur-RNA-Gene so stark ab, dass Computerprogramme sie in Sequenzdatenbanken nicht verlässlich identifizieren können. Um die Entwicklung entsprechender Technologien zu fördern, hat das amerikanische Nationale Institut zur Erforschung des Humangenoms im letzten Herbst ein ehrgeiziges Projekt zur Erstellung einer »Enzyklopädie der DNA-Elemente« aufgelegt. Kosten: 36 Millionen US-Dollar, Ziel: sämtliche RNAs und Proteine zu katalogisieren, die von ausgewählten Bereichen des Humangenoms exprimiert werden. Für das erste Prozent der menschlichen DNA sind allein drei Jahre veranschlagt.

Noch ist nicht abzusehen, wie sich die Paradigmen der Molekulargenetik verändern werden, wenn die bisher verborgenen Ebenen der Information deutlicher zu Tage treten. »Was als DNA-Schrott abqualifiziert wurde, weil wir seine Funktion nicht verstanden hatten, könnte sich als eigentliche Quelle der Komplexität des menschlichen Organismus erweisen«, spekuliert Mattick. Nicht nur die Entdeckung von aktiven Pseudogenen, Riboswitches und vielen anderen unkonventionellen Elementen spricht dafür.

Wie sich in letzter Zeit nämlich gezeigt hat, kontrollieren aktive RNAs auch die großräumige Chromosomenstruktur und ihre chemischen Modifikationen – also eine gänzlich andere Informationsebene. Die Erforschung dieser »epigenetischen« Mechanismen könnte dazu beitragen, einige der großen Rätsel der Genetik zu lösen: Wie überleben die Menschen mit einem Genom, das übersät ist mit scheinbar nutzlosen, parasitischen DNA-Elementen? Weshalb ist es so schwierig, ein erwachsenes Tier zu klonen, wenn es bei einem Embryo so einfach ist? Warum überspringen manche Merkmale einige Generationen, um dann völlig unerwartet wieder aufzutauchen? Der zweite Teil dieses Artikels im nächsten Heft befasst sich mit den »epigenetischen« Mechanismen und den ersten Versuchen, sie für Medizin und Biotechnologie zu nutzen. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



W. Wayt Gibbs ist Redakteur bei Scientific American.

Challenging the dogma: the hidden layers of non-protein-coding RNAs in complex organisms. Von John S. Mattick in: BioEssays, Bd. 25, S. 930, Oktober 2003

Widespread occurrence of antisense transcription in the human genome. Von Rodrigo Yelin et al. in: Nature Biotechnology, Bd. 21, S. 379, April 2003

An expanding universe of noncoding RNAs. Von Gisela Storz in: Science, Bd. 296, S. 1260, 17. Mai 2002

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Erdöl unter der Tiefsee

Die Ablagerung enormer Sedimentmassen am Boden des Südatlantiks seit seiner Öffnung vor rund 140 Millionen Jahren hat reiche Lagerstätten an fossilen Brennstoffen geschaffen. Geologen versuchen derzeit abzuschätzen, bis in welche Meerestiefen sich die Öl- und Gasvorkommen erstrecken.



ALLE GRAFIKEN: DELPHINE BAILLY

Von Alain-Yves Huc

Bis 2020 wird sich die Weltbevölkerung gegenüber 1980 von 4 auf 8 Milliarden Menschen verdoppelt haben. Als Folge davon dürfte der weltweite Energiebedarf um rund fünfzig Prozent zunehmen. Werden die Energievorräte ausreichen, ihn zu decken? Generell lautet die Antwort »ja«. Es gibt vielerlei Methoden der Energiegewinnung, und für ein bis zwei Generationen dürften auch noch genügend fossile Brennstoffe vorhanden sein. Legt man den aktuellen Verbrauch zu Grunde, so sind die bekannten Kohlereserven erst in 250 Jahren, die Vorräte an Erdöl und Erdgas frühestens in einigen Jahrzehnten erschöpft.

Allerdings verteilt sich der Bedarf geografisch sehr ungleichmäßig, wobei viele Länder der Dritten Welt gegenüber den Industrienationen inzwischen kräftig aufholen. Ähnlich ungleichmäßig sind die bekannten Lagerstätten verteilt: Ungefähr siebzig Prozent der weltweiten Vorräte an Erdöl und vierzig Prozent der Erdgasreserven konzentrieren sich in den Ländern des Mittleren Ostens.

Da immer weniger leicht zugängliche Erdölvorkommen entdeckt werden, zwingt der steigende Bedarf die Mineralölkonzerne dazu, auch Lagerstätten zu erschließen, die zuvor als nicht nutzbar galten. Dazu zählen etwa solche in großen Wassertiefen in den ausgedehnten submarinen Sedimentbecken. Damit ihre Ausbeutung wirtschaftlich ist, müssen sie allerdings mehrere hundert Millionen Fass (Barrels, ein Barrel entspricht 159 Litern) enthalten und mindestens 10 000 Fass pro Tag liefern können.

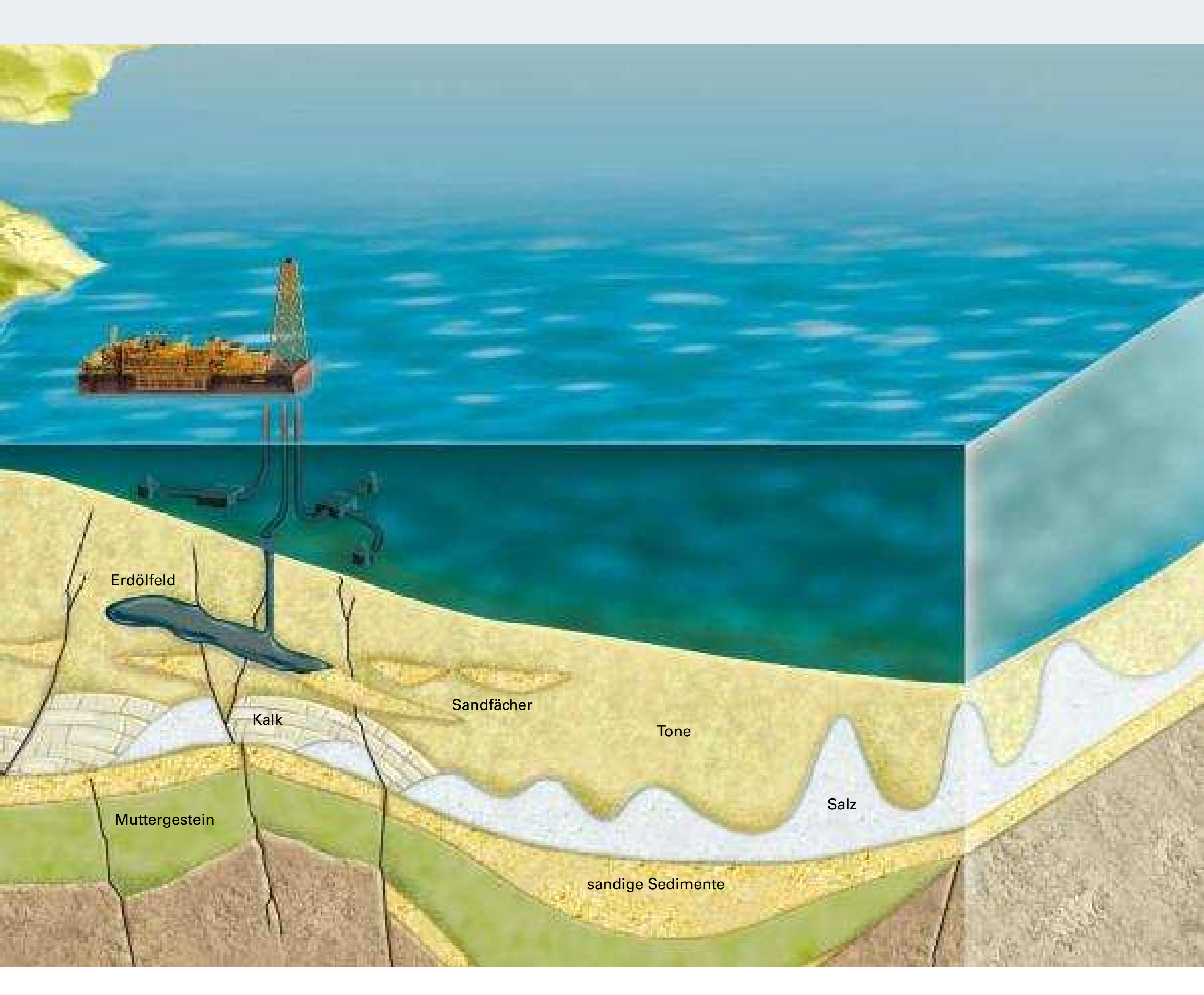
Viele solche Erdölfelder befinden sich im tiefen Südatlantik; dort lagern etwa sieben Prozent der Weltreserven an fossilen Kohlenwasserstoffen. Deshalb hat die französisch-belgische Mineralölfirma TotalFinaElf (inzwischen in Total umbenannt) Ende 2001 vor der Küste Angolas die größte schwimmende Erdölplattform der Welt in Betrieb genommen. Die Anlage erschließt ein Feld namens Girassol (portugiesisch für Sonnenblume) in 1400 Meter Wassertiefe. Bis zu 200 000 Fass qualitativ hochwertigen Rohöls werden hier tagtäglich heraufgepumpt und gespeichert.

Extreme Förderbedingungen

Wegen der extremen Verhältnisse in solchen Tiefen stellt diese Unternehmung beispiellose Anforderungen. Während das Wasser am Meeresgrund etwa vier Grad Celsius kalt ist, beträgt die Temperatur der Kohlenwasserstoffe im Inneren des Speichergesteins rund 65 Grad. Beim Austritt ist das Erdöl noch 58 Grad heiß, und auf dem Weg nach oben darf es auf keinen Fall unter vierzig Grad abkühlen, weil sich sonst Paraffinklumpen bilden.

Außerdem wird, wenn das sandige Speichergestein sehr locker ist, auch dieses teilweise ungewollt mit dem Rohöl zusammen heraufgepumpt und droht die Förderanlage zu verstopfen. Die durchströmende Mischung aus Öl, Wasser und Sand stellt die Rohrleitungen und die Anlage insgesamt auf eine harte Probe.

Aber nicht erst die Förderung des Erdöls aus großen Wassertiefen, sondern auch die Suche danach ist bereits sehr schwierig. Im Südatlantik konnten die Prospektoren davon profitieren, dass es den Geologen in den vergangenen Jahrzehnten gelungen ist, immer genauer herauszufinden, wie sich fossile Kohlenwasserstoffe bilden. Einerseits haben sie leistungsfähigere Methoden entwickelt, geologische Strukturen im Untergrund sichtbar zu machen. Andererseits konn-



Ölvorkommen haben sich am Rand, aber auch in tieferen Regionen des Südatlantiks gebildet. Heute werden bereits Lagerstätten am Boden der Tiefsee ausgebeutet, was vor kurzem noch technisch unmöglich schien. Aufgabe der Geologen ist, mit Sondierungen, Simulationen und theoretischen Überlegungen die Lage der schwer zugänglichen Vorkommen zu ermitteln.

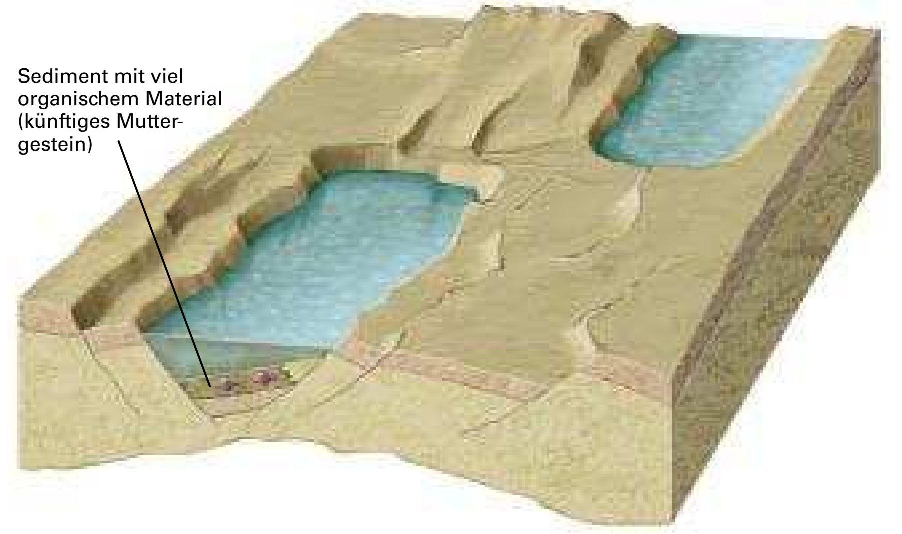
ten sie die Definition eines »Erdölsystems« präzisieren.

Der Begriff bezeichnet jenen Teil eines Sedimentbeckens, der alle geologischen Voraussetzungen für die Bildung und Speicherung von Kohlenwasserstoffen erfüllt und in dem zugleich irgendwann die physikalischen und chemischen Bedingungen herrschten, bei denen das Öl oder Gas reifen konnte. Die vier geologischen Voraussetzungen sind ein »Muttergestein«, ein »Speichergestein« als Teil eines Drainagesystems, ein »Deckgestein« und eine »Fangstruktur«. Zudem muss das Muttergestein so tief absinken, dass es den hohen Temperaturen ausgesetzt wird, unter denen die chemische Reifung stattfindet.

Sedimentbecken sind gleichsam Dellen in der Erdkruste, entstanden durch geodynamische Vorgänge infolge der Wanderung der großen, starren Lithosphärenplatten, aus denen die feste Erdschale besteht. Zunächst meist von einem Meer bedeckt, füllen sie sich im Verlauf einiger zehn Millionen Jahre mit Ablagerungen: Tonen, Sanden, Kalken und Salzen, die sich schließlich zu Gesteinen verfestigen.

Unter dem Gewicht der Sedimentdecke, die im Durchschnitt um einige Millimeter pro Jahr wächst, vertieft sich die eingedellte Erdkruste zusätzlich. Diese Absenkung unter dem doppelten Einfluss von Tektonik und Sedimentlast – Geologen sprechen von Subsidenz – kann im Extremfall zwanzig Kilometer betragen, was zu entsprechend mächtigen Ablagerungen führt. Das Pariser Becken ist ein Beispiel. In seinem tiefsten Teil erreicht die Füllung eine Mächtigkeit von 3000 Metern.

Zum Muttergestein für Erdöl werden Sedimente, wenn sie mindestens ein bis zwei Gewichtsprozent organisches Material enthalten: Gewebsreste von Organismen, welche in der Nähe gelebt ha- ▷



Bei der Öffnung des Südatlantiks entstand zunächst eine tausende Kilometer lange Rinne, in der sich große, mit Süßwasser gefüllte Einsturzgräben aneinander reihten. Darin wurden mächtige Sedimentschichten abgelagert, die viel organisches Material vom so genannten Typ I enthielten. Sie wechselten mit sandigen und kalkigen Sedimenten ab, die sich als Speichergestein eigneten.

ben – vorwiegend planktonische Algen, höhere Pflanzen und Bakterien. Solche organikreichen Sedimente sind selten, da sie ein Ökosystem mit extrem hoher biologischer Produktivität erfordern. Außerdem müssen sich die abgestorbenen Lebewesen auf schnellstem Weg an einem Ort ablagern, der frei von Sauerstoff ist. Andernfalls würden aerobe Bakterien und benthische (am Meeresboden lebende) Organismen auf der angesammelten Biomasse üppig gedeihen und sie rasch verzehren. Meist bestehen die Gesteine mit hohem Organikgehalt aus Ton oder Mergel (Gemisch aus Ton und Kalk). Sie sind deshalb feinkörnig und wenig porös, also ziemlich undurchlässig.

Je nach Art des enthaltenen organischen Materials ordnet man die Muttergesteine drei großen Kategorien zu. Der wenig verbreitete Typ I besteht vorwiegend aus Resten von Bakterienmembranen und einzelligen Algen, die in Süßwasserseen leben. Seine Qualität ist sehr gut; denn siebzig bis achtzig Gewichtsprozent der eingebetteten Biomasse können sich unter günstigen Bedingungen in Kohlenwasserstoffe umwandeln. Muttergesteine dieses Typs kommen zum Beispiel in den Sedimenten von Seen am Westrand Afrikas und Ostrand Südamerikas vor. Sie haben sich dort zu Beginn der Kreidezeit vor 140 Millionen Jahren abgelagert. Ferner gibt es sie in weniger als halb so alten Becken in Südostasien oder auf dem chinesischen Festland.

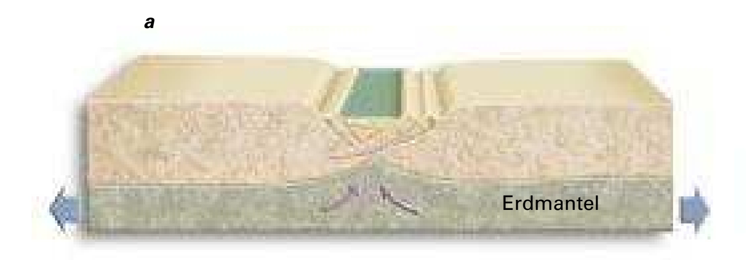
Der häufigere Typ II enthält Reste planktonischer Meeresalgen. Zu ihm gehören die Muttergesteine der Nordsee, Venezuelas und Saudi-Arabiens. Maximal dreißig bis sechzig Gewichtsprozent ihres Organikgehalts wandeln sich unter optimalen Bedingungen in Kohlenwasserstoffe um. Typ III schließlich (aus dem auch die Kohle entsteht) stammt von Überresten einer höher entwickelten Vegetation auf dem Festland – typischerweise in Flussdeltas. Zwar können sich hier nur zehn bis dreißig Gewichtsprozent des Organikgehalts in Kohlenwasserstoffe umwandeln, doch ist die produzierte Erdölmenge erheblich, da sich die betreffenden Sedimentpakete oft mehrere hundert Meter hoch auftürmen.

Fallen auf dem Weg nach oben

Die gebildeten Kohlenwasserstoffe erzeugen im Muttergestein einen Überdruck und werden dadurch in weniger kompressible benachbarte Schichten gedrückt. Sind das poröse, durchlässige Gesteine mit Rissen und Verwerfungen, die zu fünf bis dreißig Prozent aus Hohlräumen bestehen, dann eignen sie sich als Speicher- und Drainagekomplex. Die Kohlenwasserstoffe können darin zu-

Die Geburt eines Meeresbeckens

a



b





Einst gehörte Südamerika zu dem riesigen Superkontinent Pangäa. Doch dann dünnte magmatisches Material, das entlang des künftigen Mittelatlantischen Rückens aufstieg, die kontinentale Kruste aus, sodass sie stellenweise einbrach *(a)*. Allmählich verbreiterte sich die anfängliche Rinne zu einem großen Sedimentationsbecken, dessen Boden zunächst noch aus granitischer kontinentaler Kruste bestand *(b)*. Dann begann an der Spaltstelle jedoch Magma aus dem Erdmantel auszutreten und einen mittelozeanischen Rücken zu bilden, an dem eine basaltische ozeanische Kruste entstand *(c)*. Deren älteste Teile, die sich an

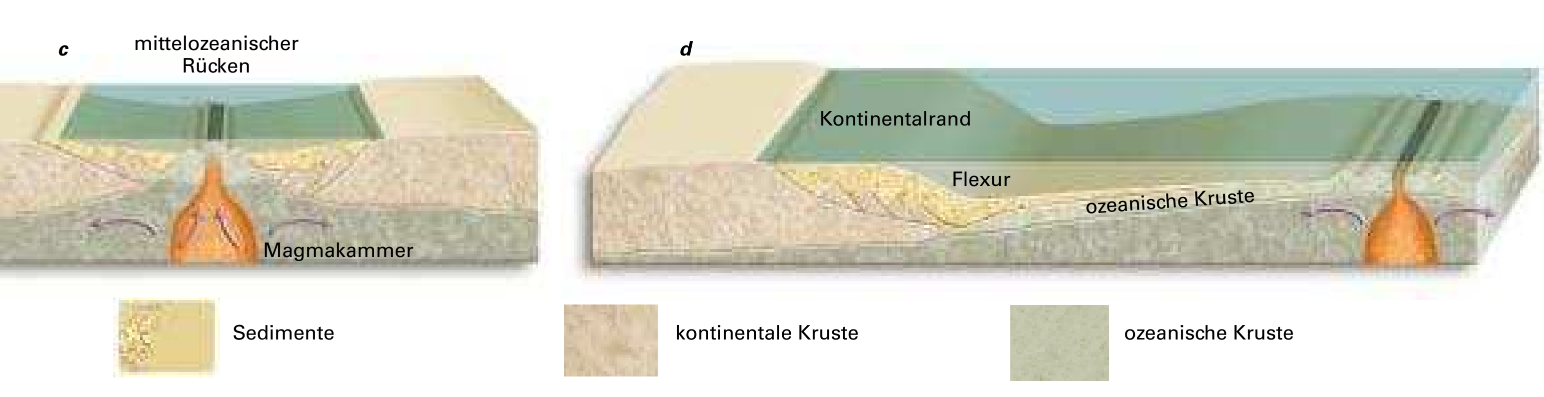
TOTAL

▲ Die größte schwimmende Förderplattform der Welt gewinnt aus dem Erdölfeld Girassol in 1400 Meter Wassertiefe vor der Küste Angolas täglich bis zu 200000 Fass Rohöl.

nächst einmal weiterwandern. Da sie spezifisch leichter sind als das Wasser, von dem die Sedimentgesteine durchdrungen sind, steigen sie unter dem Einfluss von Auftriebskräften mehr oder weniger senkrecht empor, bis sie auf ein unpassierbares Deckgestein – in der Regel aus Ton oder Evaporit (verfestigtem Salz) – stoßen, das sie in der porösen Schicht zurückhält. Fehlt eine solche Sperre, dringen sie schließlich bis zur Oberfläche vor, wo sie durch natürliche chemische oder biologische Prozesse zerstört werden. Auf dieser Weise gelangen schätzungsweise genauso viele Kohlenwasserstoffe in die Umwelt wie durch menschliche Aktivitäten.

Das Deckgestein genügt aber noch nicht; es muss eine Fangstruktur hinzukommen, in der sich die im Drainagesystem migrierenden Kohlenwasserstoffe ansammeln. Es gibt zwei Arten davon. Strukturfallen entstehen auf Grund geometrischer Besonderheiten. So sammelt sich Erdöl unter nach oben gewölbten (antiklinalen) Falten des Deckgesteins oder an Stellen, wo zwei unpassierbare Schichten schräg aufeinander stoßen. Bei stratigrafischen Fallen verringert sich dagegen plötzlich die Porosität des Speicherkomplexes – etwa am Übergang zu einem undurchlässigen Gestein. Die Poren können aber auch durch mineralische Verkittung verstopft sein.

Selbst wenn all diese geologischen Voraussetzungen in einem Sedimentbecken erfüllt sind, müssen geeignete thermische Bedingungen hinzukommen, damit auch wirklich Erdöl entsteht. Das ist der Fall, wenn sich das Sedimentbecken weiter füllt und das Muttergestein fortschreitend verschüttet wird. Dadurch gerät es immer tiefer unter die Oberfläche und erwärmt sich zunehmend, weil die Temperatur um etwa dreißig Grad Celsius pro Tiefenkilometer zunimmt. Die Hitze spaltet (crackt) schließlich das fossilierte organische Material im Inneren des Gesteins, sodass es sich in chemische ▷



den Kontinentalrändern befanden, kühlten sich zunehmend ab. Da ihre Dichte dabei zunahm, sanken sie auf Grund ihres Gewichtes ab und erzeugten eine so genannte Flexur *(d)*. In den resultierenden Vertiefungen sammelten sich die vom Land abgetragenen Sedimente. Damit waren die Bedingungen für die Bildung von Gas- und Erdölvorkommen erfüllt.

Sedimentation im sich öffnenden Südatlantik



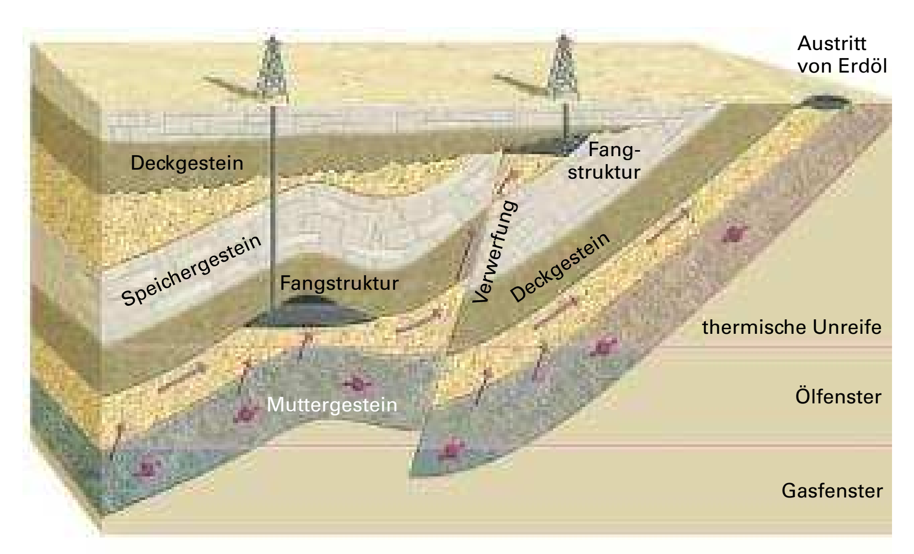
Während der Bildung des Südatlantiks gab es mehrfach günstige Bedingungen für die Sedimentation von Erdöl-Muttergestein. Gleich nach dem Aufbrechen des Kontinents lagerten sich in wassergefüllten Gräben Muttergesteine vom Typ I ab *(a)*. Als die Trennfuge bis zu 500 Kilometer breit geworden war, bildete sich ein lang gezogenes ozeanisches Becken. Es wurde mehrfach vom Weltmeer abgeschnitten und dunstete ein, wobei sich bedeutende Mengen an Salz und Sedimenten mit viel Biomaterial vom Typ II absetzten *(b)*.

Auch als sich das Becken noch mehr erweitert hatte, blieb der Kontakt mit dem Weltmeer eingeschränkt, was die Zirkulation des Wassers und seine Anreicherung mit Sauerstoff behinderte. So herrschten günstige Bedingungen für die Sedimentation von organischem Material und die Bildung von

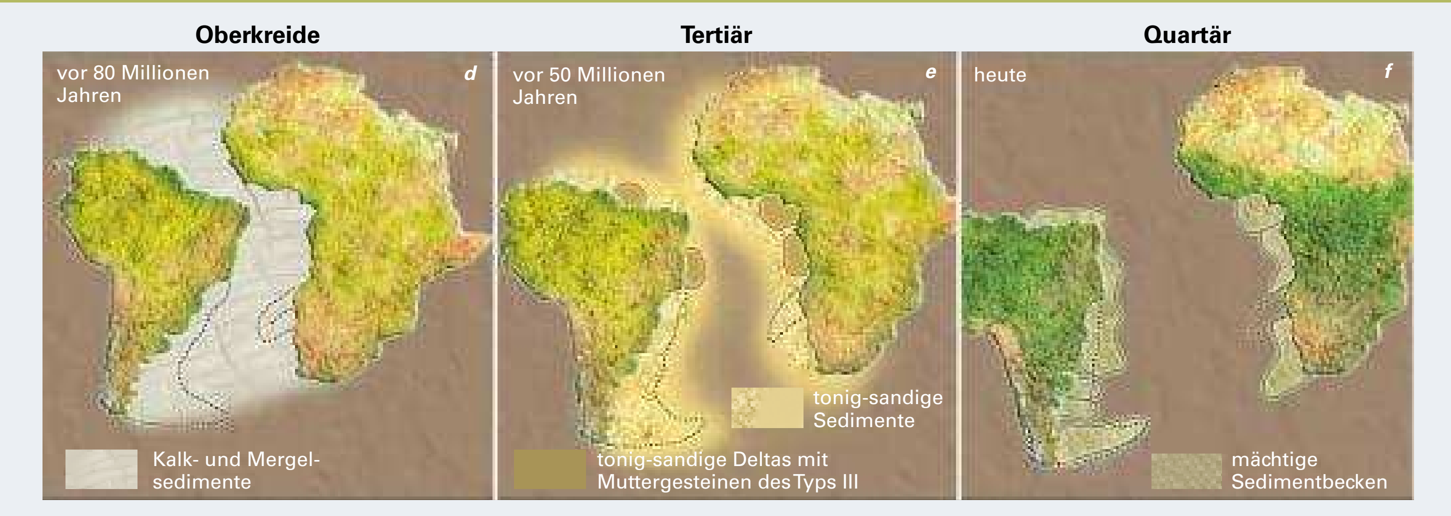
▷ Verbindungen mit immer geringerem Molekulargewicht umwandelt. Erdöl ist ein Gemisch aus solchen Verbindungen. Es wird zum Erdgas, wenn sich bei weiter steigender Temperatur der Crack-Prozess fortsetzt. Je nachdem, welches Produkt unter den jeweiligen Bedingungen entsteht, spricht man von Öl- oder Gasfenster.

Die Spaltung ist ein »kinetisches« Phänomen, was bedeutet, dass die Zeit eine wesentliche Rolle spielt: Eine längere Dauer des Crack-Vorgangs kann eine geringere Temperatur kompensieren. So erreichte das tertiäre Muttergestein, in dem sich das kalifornische Erdöl gebildet hat, sein Ölfenster bei 135 Grad Celsius schon nach 20 Millionen Jahren. Dagegen benötigte das Muttergestein des Pariser Beckens 100 Millionen Jahre, bis sich bei hundert Grad sein spezifisches Ölfenster auftat.

Wie lassen sich diese allgemeinen Vorstellungen nun auf die Erdölprovinzen im Südatlantik anwenden? Dieser begann sich in der frühen Kreidezeit vor 140 Millionen Jahren zu öffnen. Damals spaltete sich die gewaltige Landmasse Pangäa in zwei Kontinente, aus denen Amerika und Afrika hervorgingen. Zunächst dünnte an der späteren Trennlinie durch den Aufstieg teilweise geschmolzener magmatischer Gesteine die kontinentale Kruste aus. Dann zerbrach sie. In dieser Riftphase bestand der spätere Südatlantik aus einer Serie von annähernd parallel angeordneten Gräben, in denen sich große Seen bildeten. Darin setzten sich mächtige Sedimentschichten



◀ **Ein Erdölsystem besteht aus Mutter-, Speicher- und Deckgesteinen sowie Fangstrukturen. Außerdem müssen chemisch-geologische Prozesse stattfinden, in deren Verlauf sich Kohlenwasserstoffe bilden und sammeln. In den tiefen Schichten entsteht vor allem Gas, darüber Erdöl. In den oberen Lagen haben Temperatur und Reifezeit für die Umwandlung des biologischen Ausgangsmaterials in Kohlenwasserstoffe (noch) nicht ausgereicht.**



Muttergesteinen des Typs II *(c)*. Erst in der Oberkreide hatte sich der Südatlantik so weit geöffnet, dass er ausreichend mit Sauerstoff versorgt wurde. Damit konnten sich keine Muttergesteine mehr bilden. Jetzt wurden hauptsächlich Mergel deponiert *(d)*.

Doch ab dem Ende der Kreidezeit begannen Sedimente, die von den Kontinenten abgetragen worden waren, den Platz zu füllen, den die Verbiegung der Kontinentalränder durch die sich absenkende ozeanische Kruste geschaffen hatte *(e)*. Der Nachschub an Gesteinsschutt vom Kontinent zu den Flexuren und damit die Mächtigkeit der abgelagerten Sedimente war an der afrikanischen Küste größer, weil dort intensivere Erosion stattfand; denn Afrika wurde teilweise angehoben, weil es mit Europa kollidierte.

mit viel organischem Material vom Typ I ab – im Wechsel mit sandigen und kalkigen Lagen, welche die Anforderungen an ein Speichergestein erfüllten.

Während die Kontinente auseinander rückten, erweiterte und vertiefte sich die Trennfuge zu einem ausgedehnten Sedimentbecken. Dabei blieben an den Rändern Afrikas und Amerikas die Reste der nichtmarinen Gräben erhalten. Aus ihnen entstanden die an Erdöl reichsten Muttergesteine des Südatlantiks, von denen ein großer Teil der Vorkommen in Angola, dem Kongo, Gabun und Brasilien stammt.

In dieser Öffnungsphase ergoss sich mehrfach Meerwasser aus benachbarten Ozeanen in das sich bildende Becken und die Gräben an seinem Rand. Es verdunstete während der Zwischenzeiten, in denen der junge Südatlantik wieder von den Weltmeeren abgeschnitten war. Dabei schieden sich mächtige Salzschichten ab, die ungefähr 120 Millionen Jahre alt sind. Sie bedeckten die nichtmarinen Becken und stellen heute die salzhaltigen Schichten im Untergrund des Südatlantiks dar.

Während sich das neue Sedimentbecken weiter öffnete, bildete sich in seinem Zentrum schließlich ein mittelozeanischer Rücken, an dem basaltisches Vulkangestein erstarrte und ozeanische Kruste erzeugte. So etablierte sich allmählich ein marines Regime. Statt der Salzschichten lagerten sich nun Kalke und Mergel, aber auch Sand ab, wodurch ausgezeichnete Speichergesteine entstanden. Allerdings verlor auch das neue Meer gelegentlich noch den Kontakt zu den benachbarten Ozeanen. Bei der Sauerstoffarmut, die sich in dem stagnierenden Wasser entwickelte, lagerten sich vorübergehend neue Muttergesteine vom Typ II ab.

Schuttrinnen am Kontinentalhang

Dieser Vorgang endete vor etwa 80 Millionen Jahren. Das Ozeanbecken war inzwischen zu groß geworden und hatte zu gute Verbindungen zu anderen Meeren, um die anoxischen Bedingungen zu bewahren. Im Rahmen weiträumiger Zirkulationsprozesse drang sauerstoffreiches Wasser aus benachbarten Ozeanen ein. Damit verschwanden die Voraussetzungen für die Bildung von Muttergesteinen.

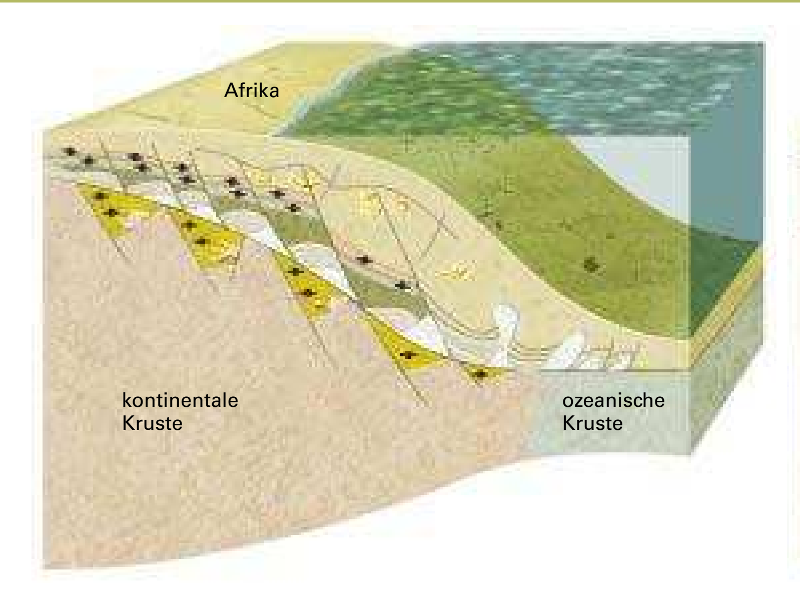
Das änderte sich erst allmählich wieder gegen Ende der Kreidezeit und insbesondere im frühen Tertiär (vor etwa 50 Millionen Jahren). Nun lieferte die Akkumulation von Sedimenten, die von den Kontinenten – vor allem vor Flussdeltas – in die Zuflussrinnen steil abfallender Becken herabgeschwemmt wurden, erneut günstige Bedingungen für die Entstehung von Erdölsystemen.

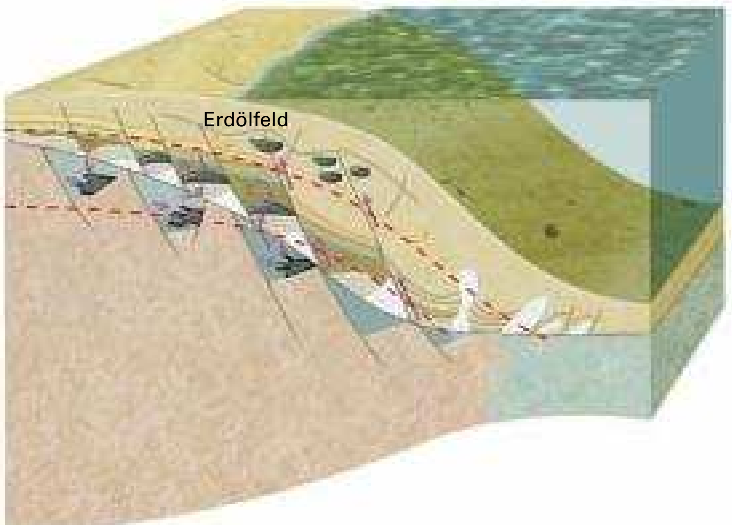
Die zunehmende Abkühlung der ältesten ozeanischen Kruste, die sich jeweils vor den Kontinentalrändern befindet, begünstigte dieses Ablagerungsregime. Beim Erkalten wurde das Gestein nämlich dichter und damit schwerer. Folglich sank die ozeanische Kruste am Kontinentalrand ab und erzeugte einen Knick, den die Geologen Flexur nennen. Er schuf einen Raum, der sich für die rasche Akkumulation großer Mengen kontinentaler Schuttmassen eignete.

So lagerten sich zum Beispiel im Nigerdelta mächtige Serien tonig-sandiger Sedimente ab. Darin findet man stellenweise Schichten mit organischem Material des Typs III, also Überresten einer kontinentalen Vegetation. Die Kohlenwasserstoffe haben sich in sandigen Rinnen angesammelt – Resten submariner Transportwege, auf denen die Sedimente in große Tiefen gelangten. Diese Reservoire sind in Tonen eingebettet, welche die Rolle des Deckgesteins spielen.

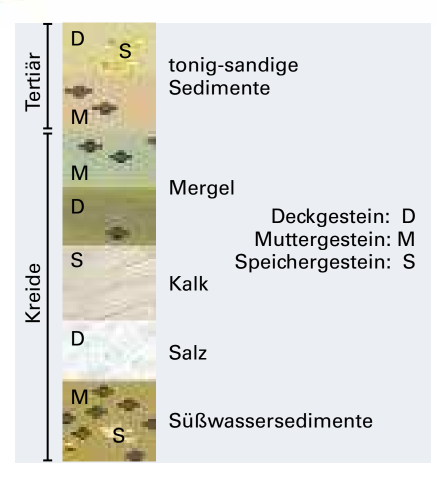
Dieser abwechslungsreichen geologischen Entwicklung verdanken der Süd- ▷

Erdölbildung vor Afrika





In schematischen Schnitten des Kontinentalrands vor der Küste von Gabun, dem Kongo und Angola sind der geologische Aufbau der Erdkruste (links) und die Entstehung der dortigen Erdöllagerstätten (rechts) dargestellt. Senken in der Basis der kontinentalen Kruste enthalten nichtmarine Sedimente mit Muttergesteinen des Typs I. Darauf ruhen Salzlagerstätten und darüber Kalkgesteine, die oft sehr gute Speicher bilden. Dann folgen Mergel, einige davon Muttergesteine vom Typ II. Darüber schließlich enthalten tonig-sandige Schichten Muttergesteine vom Typ III und Speicher, die sich in den sandigen Rinnen und Fächern befinden. Unter geeigneten Temperaturbedingungen haben sich in den verschiedenen Muttergesteinen Kohlenwasserstoffe gebildet. Sie sind in die porösen, zerklüfteten Speicherschichten übergetreten und darin gewandert (Pfeile), bis sie in Fallen unterhalb des undurchlässigen Deckgesteins gefangen blieben. Zwischen den gestrichelten roten Linien entstand Erdöl, darunter Erdgas.



atlantik und die angrenzenden Regionen ihre reichen Erdölvorkommen. Dabei haben sich gleich mehrere Familien von Muttergesteinen verschiedenen geologischen Alters in weitgehend symmetrischer Anordnung beiderseits des Atlantiks gebildet.

So gibt es sowohl im Campos-Becken vor der Küste Brasiliens als auch im unteren Kongo-Becken nichtmarine Muttergesteine vom Typ I, die zu Beginn der Öffnung des Atlantiks abgelagert wurden, sowie jüngere marine Muttergesteine vom Typ II, die aus der mittleren Kreidezeit stammen, also etwa 100 Millionen Jahre alt sind. Während sich jedoch im Kongo aus beiden Arten von Muttergesteinen Kohlenwasserstoffe gebildet haben, erreichten vor der brasilianischen Küste nur die nichtmarinen Gesteine des Typs I das Ölfenster.

Woher kommt dieser Unterschied? Die Hauptursache ist die Kollision der Afrikanischen mit der Europäischen Platte. Sie bewirkte eine Anhebung großer Teile des Schwarzen Kontinents, was die Erosion verstärkte. Während des gesamten Tertiärs (vor 65 bis 2 Millionen Jahren) beförderten die Flüsse dadurch erhebliche Mengen von Schwemmmaterial in die Deltas und lagerten es dort ab. Stellenweise – etwa an der Mündung des Niger – erreichte dieser Erosionsschutt eine Mächtigkeit von elf Kilometern. Er begrub auch noch viele afrikanische Muttergesteine des Typs II, die nach den Salzschichten abgelagert wurden, so tief, dass Kohlenwasserstoffe entstanden. An der brasilianischen Küste wurden dagegen nur die nichtmarinen Muttergesteine des Typs I unter den Salzdecken so stark verschüttet, dass sie das Ölfenster erreichten.

Außer mächtigen Sedimentdecken gibt es an den Rändern des Südatlantiks aber auch zahlreiche Verwerfungen. Sie fungieren gleichsam als Drainagerohre, die den Kohlenwasserstoffen den Aufstieg von den Mutter- zu den höher gelegenen Speichergesteinen ermöglichen. Teils stammen sie noch aus der Öffnungsphase, teils entstanden sie aber auch über Salzschichten, auf deren glatter Oberfläche die geneigten Sedimentpakete innerhalb der Flexur leicht abrutschen konnten.

Überdies enthalten die Ablagerungen an den Rändern des Südatlantiks ausgezeichnete Speichergesteine – sowohl in den Schichten unter den Salzen als auch in den Kalken darüber. Hinzu kommen sandige Rinnen und Fächer aus dem Tertiär, die beim massenhaften Transport von Erosionsschutt am Kontinentalhang abgelagert wurden. Über deren Verteilung, Aufbau und innere Struktur war bis vor wenigen Jahren noch gar nichts bekannt. Manchmal sind diese Reservoire kaum verschüttet ▷

und wenig verfestigt. Das führt zu technischen Schwierigkeiten bei der Ausbeutung eines solchen Erdölfeldes, weil zum Beispiel Absenkungen drohen. Außerdem sind die Sedimentschichten über den tertiären Speichergesteinen am Kontinentalhang vielfach noch ziemlich locker und lassen die Kohlenwasserstoffe entweichen.

Der Untergrund des Atlantiks enthält aber auch gute Deckgesteine aus Ton oder Salz. Mit zunehmender Entfernung von der Küste werden die Salzschichten immer zerstückelter und zerfallen weit draußen im Atlantik in voneinander isolierte »Flöße«. Dazwischen konnte das Erdöl aus kreidezeitlichen Muttergesteinen teilweise in höher gelegene Speicher aufsteigen. So hat die komplexe Geometrie der Sedimente an den Rändern des Südatlantiks eine Vielzahl von Fangstrukturen geschaffen: Salzflöße, antiklinale Kalkfalten der Kreidezeit und große Wellen innerhalb der tertiären Sedimente, die Rinnen inmitten undurchlässiger Tone enthalten.

In ihnen sammelte sich das Öl und Gas aus den Muttergesteinen an. Einige Reservoire befinden sich an Stellen, wo der Ozean mehr als 2000 Meter tief ist. Diese Vorkommen blieben lange unerreichbar, weil die technischen Voraussetzungen für die Förderung in mehr als 500 Meter Wassertiefe fehlten. Doch in den letzten zehn Jahren ist es vielen großen Mineralölkonzernen gelungen, bis zu mehrere tausend Meter unterhalb der Ozeanoberfläche zu arbeiten.

Raffinierte Erkundungsmethoden

Parallel dazu haben die Geologen Konzepte und Methoden entwickelt, um Vorkommen im Boden der Tiefsee aufzuspüren. Sie kennen heute nicht nur die Bildungsbedingungen eines Erdölsystems viel genauer, sondern können auch seine Struktur und seinen Inhalt sichtbar machen. Dazu verwenden sie eine Art Schallortung: die so genannte Reflexionsseismik. Dabei erzeugen sie beispielsweise mit Luftpulsern akustische Wellen im Wasser und erschließen aus deren Reflexion an den verschiedenen geologischen Strukturen im Meeresboden den Aufbau und die Beschaffenheit der Sedimentschichten.

Das Ergebnis sind zwei- oder immer öfter auch dreidimensionale Bilder des Untergrunds ähnlich denen, die heute schon zur Erkundung der Offshore-Bereiche dienen. Um die reflexionsseismischen Daten richtig zu interpretieren, müssen die Geologen alle verfügbaren Informationen über die betreffende Zone einbeziehen – vor allem solche aus schon durchgeführten Bohrungen.

Etliche Forscher greifen zudem auf numerische Simulationen von Erdölsystemen zurück, um insbesondere den Ablauf der Verfüllung eines Beckens innerhalb geologischer Zeiträume zu rekonstruieren. Oft vollziehen sie außerdem die thermische Entwicklung des Muttergesteins nach und modellieren nicht nur die Bildung der Kohlenwasserstoffe, sondern auch deren Aufstieg und Sammlung in den Fangstrukturen. Im günstigsten Fall liefern die Simulationen sogar Aussagen über die Art der Kohlenwasserstoffe in den Vorkommen, lassen also beispielsweise erkennen, ob es sich um Öl oder Gas handelt. Wenngleich die Bilder und die Ergebnisse der Simulationen noch mit einigen Unsicherheiten behaftet sind, vermindern sie das Risiko, dass eine Bohrung fehlschlägt, doch erheblich.

Wie weit reicht die Zone mit Mutter- und potenziellen Speichergesteinen im Südatlantik? Im Moment lässt sich das noch nicht genau sagen. Ein Grund dafür ist der unbekannte Verlauf der Sedimentmächtigkeit. Sie erhöht sich bis zum unteren Kontinentalhang, nimmt dann aber mit der Entfernung von der Küste unweigerlich wieder ab. Nun sind weniger verschüttete Muttergesteine bei gleichem Alter auch weniger gereift. Darum befinden sich die ältesten, nichtmarinen Muttergesteine, die in der »normalen« Tiefsee das Gasfenster erreicht haben, in den größten Wassertiefen, sofern es sie dort überhaupt gibt, höchstwahrscheinlich noch im Ölfenster. Desgleichen sind marine Muttergesteine aus der jüngeren Kreidezeit, die es in moderaten Tiefen bis ins Ölfenster geschafft haben, in den allertiefsten Regionen vielleicht noch nicht genügend gereift.

Die Abnahme der Verschüttung ist umso gravierender, als sich auch der Wärmefluss, von dem die Sedimente profitieren, zur Tiefsee hin verringert. An die Stelle der kontinentalen Kruste mit ihrem relativ hohen Gehalt an Wärme liefernden radioaktiven Isotopen tritt zunehmend ozeanische Kruste, die arm an solchen strahlenden Elementen ist. Zusammen mit der Ausdünnung der Sedimentschicht definiert dieser Effekt eine äußerste Grenze, jenseits derer kein Erdölsystem mehr Kohlenwasserstoffe produzieren kann. Die Computersimulationen sollten uns dieses Limit angeben, sobald wir genügend Daten aus den ultratiefen Bereichen gesammelt und geeicht haben.

Durcheinander gewürfelte Schichten

Die am tiefsten gelegenen Regionen eines marinen Sedimentbeckens sind oft geologisch sehr komplex, was die Interpretation der seismischen Bilder erschwert. So treten hier schwerkraftbedingte Stauchungsprozesse auf, bei denen sich die geneigten Sedimentschollen übereinander schieben und durcheinander gewürfelte Stapel erzeugen. Schließlich kann bei den wenig verschütteten Erdölsystemen in sehr großen Wassertiefen die Temperatur so niedrig sein, dass bakterielles Leben möglich ist – es verschwindet erst oberhalb von neunzig Grad Celsius. In diesem Fall kommt es zu biologischen Abbauprozessen des organischen Materials, bei denen Schweröl entsteht: eine dichte, zähe Flüssigkeit, die noch wenig erforscht und schwer zu gewinnen ist.

Diese Schwierigkeiten und Risiken sind beträchtlich. Aber in den 1970er Jahren schienen die technischen und wissenschaftlichen Hindernisse bei der Nutzung von Vorkommen unterhalb von 500 Meter Wassertiefe auch unüberwindlich. Dennoch wurden einige ehrgeizige Projekte gestartet, und die Fördermenge ist heute schon bedeutend. Befinden wir uns jetzt gegenüber den tiefsten Meeresregionen in derselben Situation wie vor drei Jahrzehnten gegenüber der »normalen« Tiefsee? In einigen Jahren werden wir es wissen.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



Alain-Yves Huc leitet das Forschungszentrum der Schule für Erdöl und Motoren des Französischen Erdölinstituts in Reuil-Malmaison bei Paris.

Erdöl. Von M. Bürgi und B. Gehr. Orell Füssli, Zürich 1997

Petroleum systems of south Atlantic margins. Von M. Mello und B. J. Katz (Hg.). American Association of Petroleum Geologists, Memoir 73, 2000

20 ans dans l'amont pétrolier. Von G. Subielles in: Pétrole et Techniques, Bd. 429, S. 35 (2000)

Le Pétrole, une épopée. Von X. Bois de la Tour. Collection Explora, Press Pocket, 1993

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Grenzen der Berechenbarkeit

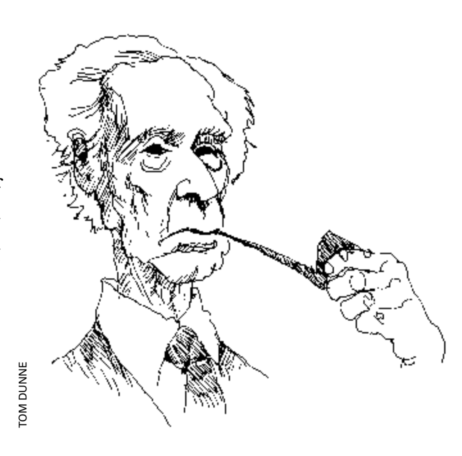
Der Zufall gehört unvermeidlich zur Mathematik, und es gibt stets wahre, aber unbeweisbare Sätze. Kein Anlass zu Pessimismus: Die Grenzen unserer Erkenntnis sind bestimmt durch die begrenzte Größe unserer Erkenntniswerkzeuge; und die lässt sich aufstocken.

Von Gregory J. Chaitin

Computer sind ohne Zweifel überaus nützliche Geräte – so nützlich, dass eine moderne Gesellschaft kaum noch auf sie verzichten kann. Aber dafür wurden sie gar nicht erfunden. Eigentlich ging es den Vordenkern der heute allgegenwärtigen Rechner um ein philosophisches Grundlagenproblem der Mathematik (ich übertreibe nur ein bisschen). Diese erstaunliche Tatsache ist selbst den meisten Computerexperten nicht geläufig.

Die Geschichte beginnt mit David Hilbert (1862–1943), der allgemein als der führende Mathematiker seiner Zeit gilt. Zu Beginn des 20. Jahrhunderts rief Hilbert zur vollständigen Formalisierung mathematischen Beweisens auf. Dreißig Jahre später stellte sich heraus, dass genau dies aus prinzipiellen Gründen unmöglich ist. Damit war Hilberts Programm einerseits ein spektakulärer Fehlschlag, andererseits ein grandioser Erfolg, denn die Idee des Formalismus trug reiche Früchte. Nicht so sehr für die Theorie mathematischen Beweisens als vielmehr für die Entwicklung der Computer- und Informationstechnik des 20. Jahrhunderts.

Ich möchte diese fast in Vergessenheit geratene Geschichte erzählen, ohne mich in mathematischen Details zu verlieren. Es würde viel zu viel Mühe kosten, die Beiträge der bedeutenden Protagonisten wie Bertrand Russell, Kurt Gödel und Alan Turing vollständig zu erklären. Aber mit etwas Geduld, so hoffe ich, können Sie das Wesentliche der verschiedenen Gedankengänge nachvollziehen – bis hin zu meinen eigenen Vorstellungen über den Zufall als natürlichen Bestandteil der Mathematik.

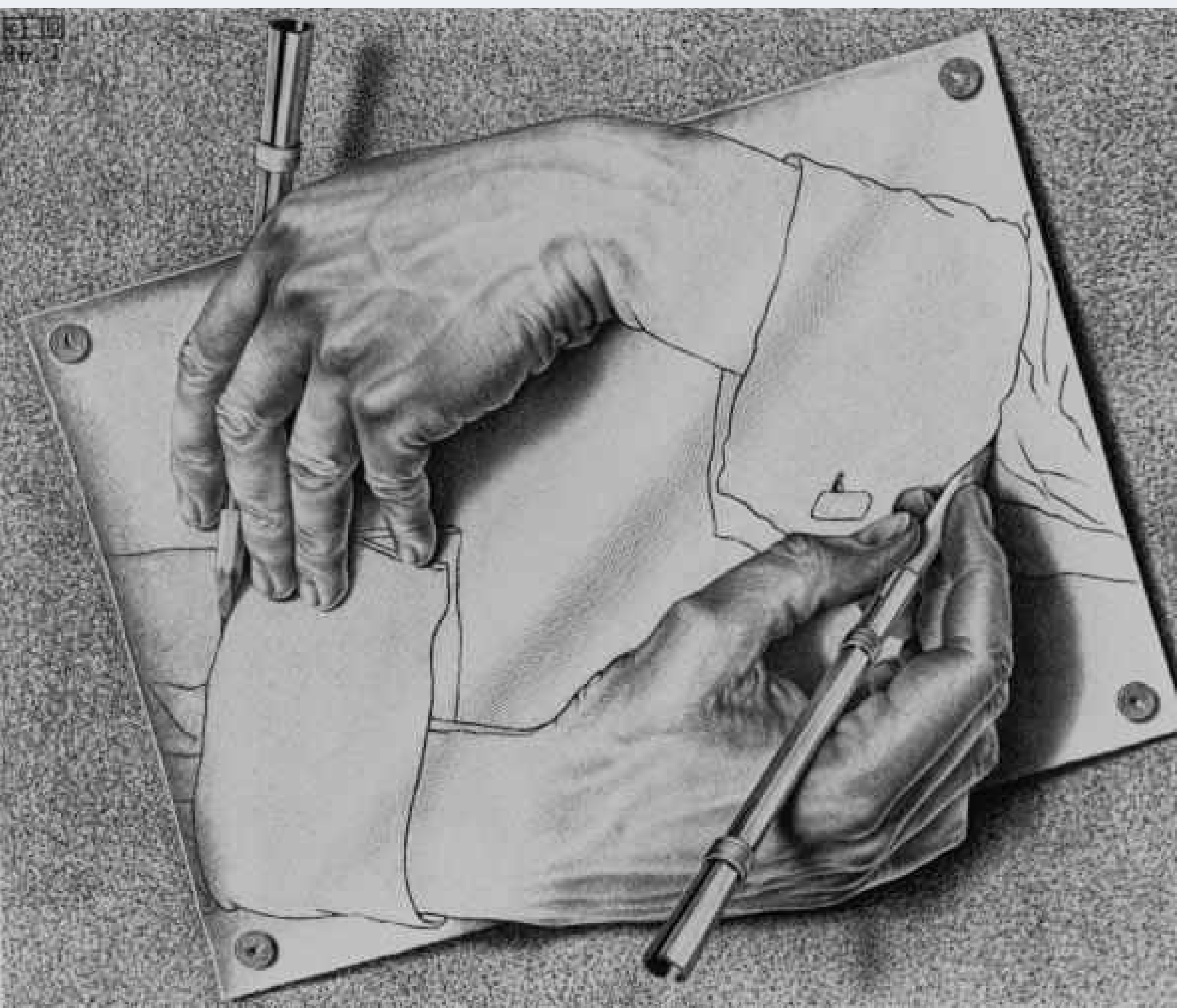

TOM DUNNE

Russells Paradoxon

Beginnen wir mit Bertrand Russell (1872–1970), der seine wissenschaftliche Laufbahn als Mathematiker begann, sich dann der Philosophie zuwandte und schließlich zum Humanisten wurde. Russell ist eine Schlüsselfigur in unserer Geschichte, denn er entdeckte Besorgnis erregende Paradoxa innerhalb der Logik selbst, genauer gesagt Fälle, in denen das reine, anscheinend wohl fundierte Denken auf Widersprüche führt. Das erschütterte das Fundament der Logik und damit zugleich das der Mathematik, die sich auf die Logik gründet. Mit dem Gedanken, dass die dadurch entstandene »Grundlagenkrise der Mathematik« dringend einer Lösung bedürfe, hat Russell seine Zeitgenossen stark beeinflusst.

Merkwürdigerweise trägt heute unter den Paradoxa, die Russell entdeckte, nur eines seinen Namen, und zwar dieses: Sei M die Menge aller Mengen, die sich nicht selbst als Element enthalten. Enthält die Menge M sich selbst? Wenn ja, dann gehört sie nicht zur Menge aller Mengen, die sich selbst nicht als Element enthalten. Das ist aber gerade die Menge M. Also enthält die Menge M nicht sich selbst. Geht man aber davon aus, sie enthalte nicht sich selbst, landet man ebenfalls beim Gegenteil der Aussage, mit der man begann.

Die anschaulichere Verkleidung des Russell'schen Paradoxons handelt von dem Dorfbarbier; das ist per definitionem derjenige Dorfbewohner, der alle männlichen Dorfbewohner rasiert, die sich nicht selbst rasieren. Das klingt zunächst ganz vernünftig – bis man danach fragt, ob der Barbier sich selbst rasiert.



Eine Hand zeichnet die andere, und umgekehrt. Jede der beiden Handlungen ist für sich genommen unproblematisch; erst ihre Kombination schafft ein Paradox, wie in dem Satzpaar »Die nachfolgende Behauptung ist wahr / Die vorhergehende Behauptung ist falsch«. Zeichnung von Maurits C. Escher, 1948.

Rasiert er sich nicht selbst, dann rasiert ihn der Barbier; das ist aber er selbst, also rasiert er sich selbst, also rasiert ihn nicht der Barbier, also …

Nun mag man das mit einem gewissen Recht eine alberne Frage nennen. Was soll man sich über die Probleme eines hypothetischen Barbiers den Kopf zerbrechen? Soll der Mann sich doch einen Vollbart wachsen lassen. Doch im Zusammenhang mit dem mathematischen Mengenbegriff ist das Problem nicht so einfach beiseite zu schieben.

Über eine Frühform des Russell'schen Paradoxons – ohne die mengentheoretische Formalisierung – haben sich schon die Griechen der Antike den Kopf zerbrochen. Das »Paradoxon des Epimenides« oder »Lügnerparadoxon« handelt von einem Ausspruch, den ein Mensch namens Epimenides getan haben soll: »Diese Behauptung ist falsch.« Ist sie nun falsch? Wenn ja, dann trifft die Behauptung des Satzes zu, also ist sie wahr. Einerlei ob Sie die Behauptung für wahr oder falsch halten: Sie können dem Widerspruch nicht entgehen!

Man kann das Problem auch in zwei Sätze zerlegen: »Die nachfolgende Behauptung ist wahr. Die vorhergehende Behauptung ist falsch.« Jede Aussage für sich ist unproblematisch, aber miteinander verbunden ergeben sie keinen Sinn. Das alles mag wie ein bedeutungsloses Wortspiel anmuten, aber einige große Denker des 20. Jahrhunderts haben es sehr ernst genommen. ▷


TOM DUNNE

Hilberts Rettungsversuch

Hilberts Ansatz, die Krise der Logik zu überwinden, bestand im Formalismus. Vielleicht waren ja die unauflöslich scheinenden Widersprüche durch die Vieldeutigkeit der gewöhnlichen Sprache verursacht und lösten sich auf, wenn man die umgangssprachlichen Sätze nicht wie üblich irgendwie, sondern richtig interpretierte. Also erzeuge man mit Hilfe der symbolischen Logik eine künstliche Sprache mit sehr strengen Regeln, die keine Interpretationsfreiheit und insbesondere keine Widersprüche zulassen.

Eine solche perfekte künstliche Sprache wollte Hilbert für das logische Schließen im Allgemeinen und für die Mathematik im Besonderen schaffen. Das läuft auf die »axiomatische Methode« hinaus: Man setzt sich gewisse grundlegende Behauptungen (»Postulate« oder »Axiome«) sowie wohldefinierte Deduktionsregeln und leitet aus den Axiomen unter Verwendung der Regeln gültige Sätze der Theorie her. Das Vorbild für die axiomatische Methode sind die »Elemente« des Euklid, ein Werk, in dem das gesammelte mathematische Wissen der Griechen um 300 v. Chr. in einer auch für heutige Verhältnisse bewundernswerten Klarheit aus den Axiomen entwickelt wird.

Hilbert ging es darum, vollkommene Klarheit über die Spielregeln zu schaffen: über die Definitionen, die Grundbegriffe, die Grammatik und die Sprache. Dies sollte jeden Dissens darüber, wie Mathematik zu betreiben ist, aus der Welt schaffen. Ein derartiges formales axiomatisches System wäre zwar viel zu schwerfällig, um damit neue mathematische Ergebnisse zu finden, aber gleichwohl philosophisch höchst bedeutsam.

Hilberts Projekt war die konsequente Fortführung einer langen Tradition, die auf Mathematiker wie Gottfried Wilhelm Leibniz (1646 – 1716), George Boole (1815 – 1864), Gottlob Frege (1848 – 1925) und Giuseppe Peano (1858 – 1939) zurückgeht. Neu war vor allem die Radikalität des Vorhabens: Die gesamte Mathematik sollte formalisiert werden.

Als sich herausstellte, dass dies unmöglich ist, war das eine Jahrhundertüberraschung. Hilbert hatte sich geirrt, doch sein Irrtum erwies sich als über die Maßen fruchtbar. Der Ruhm gebührt ihm also nicht für die (falsche) Antwort, sondern für die gute Frage. Denn mit ihr hat er ein neues Forschungsgebiet begründet: die Metamathematik. Ihr Ziel ist es zu ergründen, welche Ergebnisse die Mathematik liefern kann und welche nicht.

Die Grundidee ist folgende: Sowie man im Sinne von Hilbert die Mathematik in eine künstliche Sprache gezwängt und damit ein vollständig axiomatisches System erzeugt hat, kann man die ursprüngliche Bedeutung der mathematischen Begriffe vergessen. Man spielt einfach ein Spiel mit Zeichen auf Papier, bei dem man Sätze aus Axiomen ableitet. Natürlich interessiert einen die Bedeutung der Zeichen, wenn man Mathematik treibt. Will man aber die Mathematik selbst mit mathematischen Methoden untersuchen, muss man genau davon absehen und darf lediglich eine künstliche Sprache mit ganz präzisen Regeln untersuchen.

Welche Fragen kann man in diesem Zusammenhang stellen? Zum Beispiel, ob die Aussage 1 = 0 beweisbar ist. (Hoffen wir, dass die Antwort Nein ist!) Allgemein kann man für jede Aussage A fragen, ob A beweisbar ist – oder ob das Gegenteil von A beweisbar ist. Wir nennen ein formales Axiomensystem vollständig, wenn jede in dem Axiomensystem formulierbare Aussage A entweder beweisbar oder widerlegbar (das heißt ihr Gegenteil beweisbar) ist.

Dabei stellte Hilbert sich die Regeln so klar und unzweideutig vor, dass ihre Nachprüfung eine völlig mechanische Angelegenheit wäre. Man könnte jeden Beweis einem unbestechlichen Gutachter vorlegen, der einem »mechanischen Verfahren« folgen würde. Dieser Gutachter würde den Beweis entweder akzeptieren oder mit einer Begründung verwerfen wie »Schreibfehler in Zeile 4« oder »Aussage 7 folgt nicht aus Aussage 6«; und das wäre das Ende der Diskussion.

Hilbert behauptete nicht, dass Mathematik so betrieben werden sollte. Aber wenn das im Prinzip möglich wäre, dann könnte man die Schlagkraft mathematischer Argumentation wiederum mit mathematischen Methoden untersuchen. Hilbert war der Überzeugung, dass ihm dieser Kraftakt gelingen werde. Man kann sich vorstellen, wie es die mathematische Gemeinschaft erschütterte, als 1931 ein junger Österreicher namens Kurt Gödel nachwies, dass dies unmöglich ist. Hilberts Programm kann nicht durchgeführt werden – nicht einmal im Prinzip.


TOM DUNNE

Die Gödel'sche Unvollständigkeit

Kurt Gödel (1906 – 1978) stammte aus Brünn (heute Brno, Tschechien); als er 1931 Hilberts Visionen den Todesstoß versetzte, arbeitete er an der Universität Wien. Von den Nationalsozialisten vertrieben, ging er an das Institute for Advanced Studies nach Princeton, wo sich damals auch Albert Einstein aufhielt (Bild Seite 92).

Gödels erstaunliche Entdeckung war, dass Hilberts Programm von Anfang an nicht durchführbar war. Es lag nicht daran, dass die kompliziertesten Aussagen über, sagen wir, unendlichdimensionale Vektorräume den Formalismus überfordert hätten. Hilberts Programm scheitert bereits in der Grundschule, genauer ge-

sagt, an der elementaren Arithmetik: den Zahlen 0, 1, 2, 3, … , Addition, Multiplikation und den zugehörigen Rechenregeln.

Jedes formale Axiomensystem, das versucht, die Wahrheit und nichts als die Wahrheit über Addition, Multiplikation und die natürlichen Zahlen zu sagen, ist zwangsläufig unvollständig. Genauer sagt Gödels Unvollständigkeitssatz: Ein solches Axiomensystem ist entweder unvollständig oder, was noch schlimmer wäre, es enthält innere Widersprüche. Wenn man das Axiomensystem also so konstruiert, dass es nichts als die Wahrheit sagen kann, dann sagt es einem nicht die ganze Wahrheit. Wenn man es unfähig macht, falsche Aussagen zu beweisen, dann gibt es wahre Aussagen, die es nicht beweisen kann.

Gödels Beweis der Unvollständigkeit ist sehr trickreich, ziemlich paradox und fast ein bisschen verrückt. Ausgangspunkt ist das Paradoxon vom Lügner, also die Aussage »Ich sage nicht die Wahrheit«, die weder wahr noch falsch ist. Gödel konstruiert eine Aussage, die von sich selbst behauptet: »Ich bin unbeweisbar!«

Man muss schon ziemlich genial sein, um im Rahmen der elementaren Arithmetik eine mathematische Aussage zu formulieren, die sich selbst beschreibt. Aber wenn man das geschafft hat, wird es erst richtig schwierig. Warum das? Nun, wenn die Aussage beweisbar ist, ist sie zwangsläufig falsch, und man hat einen falschen Satz bewiesen. Ist der Satz nicht beweisbar, wie er es von sich selber sagt, dann ist er wahr, also gibt es eine wahre, nicht beweisbare Aussage. Daraus folgt die Unvollständigkeit der Mathematik.

Schaut man in Gödels Originalarbeit, stößt man auf Strukturen, die einen stark an die Programmiersprache LISP erinnern. Es werden häufig rekursive Funktionen verwendet, Funktionen, die Listen abarbeiten; und die sind charakteristisch für LISP. Es gab zwar 1931 weder Computer noch Programmiersprachen; aber mittels der Gnade der späten Einsicht können wir als das Herzstück von Gödels Originalarbeit eine Programmiersprache erkennen.

Ein anderer berühmter Mathematiker dieser Zeit, John von Neumann (1903–1957), erkannte die Bedeutung von Gödels Ergebnis sofort, obwohl ihm selbst nie in den Sinn gekommen war, dass Hilberts Programm undurchführbar sein könnte. (Später trieb von Neumann die Entwicklung der Computertechnik in den USA maßgeblich voran.) Gödel war nicht nur genial, sondern auch mutig genug, sich vorzustellen, der große Hilbert könne im Unrecht sein.

Viele Mathematiker empfanden Gödels Schlussfolgerungen als absolut verheerend. Von der gesamten traditionellen Philosophie der Mathematik war in ihren Augen nur noch ein Scherbenhaufen geblieben. Die düstere Empfindung passte in die düstere Zeit: Die Wirtschaftskrise bestimmte den Alltag, und ein drohender Krieg warf seine Schatten voraus.



TOM DUNNE

Turings Maschine

Fünf Jahre später hatte sich der zentrale Schauplatz unserer Geschichte nach England verlagert, wo Alan Turing (1912–1954) die Unberechenbarkeit entdeckte. Erinnern wir uns an Hilberts Vorstellung von einem »mechanischen Verfahren«, mit dem man entscheiden könne, ob ein Beweis korrekt sei oder nicht. Hilbert hat diese Vorstellung nie näher ausgeführt; das tat nun Turing, indem er das mechanische Verfahren von einer gedachten Maschine ausführen ließ; heute nennt man sie Turing-Maschine (Kasten Seite 90).

Turings Originalarbeit enthält ebenso wie die Gödels eine Programmiersprache, genauer gesagt eine Struktur, die wir heute als Programmiersprache bezeichnen würden. Allerdings sind die beiden Sprachen sehr verschieden. Turings Erfindung von 1936 ist nicht eine höhere Sprache wie LISP, sondern eher eine Art Maschinensprache: jene für Menschen so gut wie unverständliche Folge von Nullen und Einsen, die dem zentralen Rechenwerk des Computers seine sämtlichen Einzelaktionen haarklein vorschreibt. Heute würde jeder Mensch sich mit Grausen wenden, wenn er einem Computer seine Wünsche in dieser Form mitteilen müsste.

Turings virtuelle Rechenmaschine ist sehr einfach gebaut und ihre Maschinensprache ziemlich primitiv; gleichwohl ist sie zu erstaunlichen Leistungen fähig. In seiner Arbeit von 1936 behauptete Turing, eine derartige Maschine könne jede Berechnung durchführen, zu der auch ein Mensch fähig sei.

Wirklich spannend wird der Gedankengang aber erst durch die Gegenfrage: Was kann eine solche Maschine nicht? Durch Nachdenken entlang den Argumentationslinien Gödels stieß Turing auf ein Problem, das keine Turing-Maschine lösen kann: das so genannte Halteproblem. Es besteht darin, im Voraus zu entscheiden, ob eine Turing-Maschine (oder irgendein Computerprogramm) eine gestellte Aufgabe am Ende lösen und anhalten wird.

Macht man eine Zeitvorgabe, dann ist das Halteproblem einfach zu lösen. Wenn die Frage zum Beispiel lautet, ob ein Programm innerhalb eines Jahres anhalten wird, lässt man das Programm ein Jahr lang laufen; dann merkt man ja, ob es fertig geworden ist. Wirklich schwierig wird es erst, wenn man kein Zeitlimit setzt. Es gibt Programme, die enthalten »Endlosschleifen«. Das heißt, eine gewisse Folge von Anweisungen wird ohne Ende immer wieder ausgeführt. Wollte man durch Zuschauen entscheiden, ob ein solches Programm anhält, könnte man ewig warten. Das Halteproblem ohne Zeitlimit zu lösen bedeutet also herauszufinden, ob das Programm anhält, ohne es in Gang zu setzen.

Turing argumentierte ungefähr so: Angenommen, es ist möglich, ein Programm zu schreiben, das wir einen Haltetester nennen wollen: Zu jedem beliebigen vorgelegten Computerprogramm prüft der Haltetester nach, ob es anhält oder nicht. Die Eingabedaten des Haltetesters bestehen also aus einem Programm; der Haltetester analy- ▷

▷ siert es und gibt daraufhin eine Antwort wie »Dieses Programm wird halten« oder »Dieses Programm wird nicht halten«.

Nun schreiben wir ein zweites Programm; nennen wir es den »Haltetestverderber«. Auch dieses Programm bekommt als Eingabe irgendein Computerprogramm; dann bestimmt es mit Hilfe des Haltetesters, ob das vorgelegte Programm anhalten wird. Wenn das der Fall ist, dann – und nur dann – geht es in eine Endlosschleife.

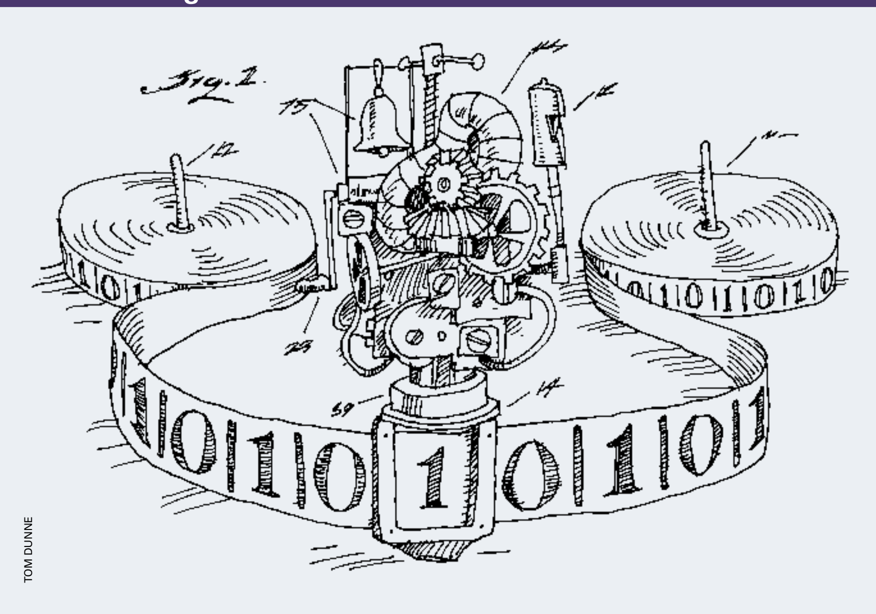
Jetzt kommen wir zum kritischen Punkt. Wenn man in den Haltetestverderber eine Kopie seiner selbst eingibt, was passiert dann?

Zur Erinnerung: Wir haben den Haltetestverderber so geschrieben, dass er in eine Endlosschleife geht, wenn das im Test befindliche Programm anhält. Aber nun ist das im Test befindliche Programm selbst der Haltetestverderber. Also geht es, so wie es konstruiert ist, in eine Endlosschleife, wenn es anhält, das heißt aber doch, es hält gerade nicht an. Das ist ein offensichtlicher Widerspruch! Es hilft auch nichts, wenn man den gegenteiligen Ausgang annimmt. Denn hält das getestete Programm nicht, so wird das vom Haltetester gemeldet, und das Programm geht nicht in die Endlosschleife, hält also an. Das Paradoxon führte Turing zu dem Schluss, dass man keinen universellen Haltetester konstruieren kann.

Interessant ist die Folgerung, die Turing daraus ableitete. Falls es unmöglich ist, im Voraus durch Berechnungen festzustellen, ob ein Programm anhalten wird oder nicht, dann gibt es auch keine Möglichkeit, dies im Voraus durch logisches Schließen zu erkennen. Es gibt kein formales Axiomensystem, mit dessen Hilfe sich entscheiden lässt, ob ein Programm schließlich anhält. Warum? Wenn man ein formales Axiomensystem in dieser Weise anwenden könnte, dann hätte man ja ein »mechanisches Verfahren« oder, was dasselbe ist, ein Computerprogramm, das entscheidet, ob ein vorgelegtes Programm anhält oder nicht, mit einem Wort: einen Haltetester. Aber den gibt es nicht, wie wir oben gesehen haben.

Man kann ein Programm schreiben, das genau dann anhält, wenn es nicht anhält. Dieses Paradoxon ist im Prinzip dasselbe, auf welches Gödel im Rahmen seiner zahlentheoretischen Untersuchungen gestoßen war. Allerdings hat Turing Gödels Aussage noch erheblich verallgemeinert.

Die Turing-Maschine



TOM DUNNE

Die hypothetische Maschine, die Alan Turing in seiner wegweisenden Arbeit von 1936 einführte, arbeitet auf einem sehr langen Magnetband, dessen Felder je ein Binärzeichen (0 oder 1) tragen. In einem Arbeitsschritt liest die Maschine das Zeichen, das sich unter ihrem Schreib-/Lesekopf befindet. In Abhängigkeit von diesem Zeichen sowie von ihrem inneren Zustand schreibt sie ein neues Zeichen an derselben Stelle aufs Band – oder auch nicht –, rückt ein Feld nach rechts oder links auf dem Band und nimmt einen neuen inneren Zustand an. Dann beginnt der nächste Arbeitsschritt.

Zu Beginn des Arbeitsprozesses stehen auf dem Band die Eingabedaten. Wenn die Maschine ihre Arbeit beendet hat, steht das Ergebnis der Berechnungen auf dem Band, die Maschine geht in den speziellen Zustand »fertig« über und hält an. Das Programm der Maschine besteht aus einer Tabelle, die zu jeder denkbaren Kombination aus gelesenem Zeichen und innerem Maschinenzustand die auszuführenden Aktionen ansagt: neues Zeichen auf dem Band, nach rechts oder nach links rücken, neuer innerer Zustand.

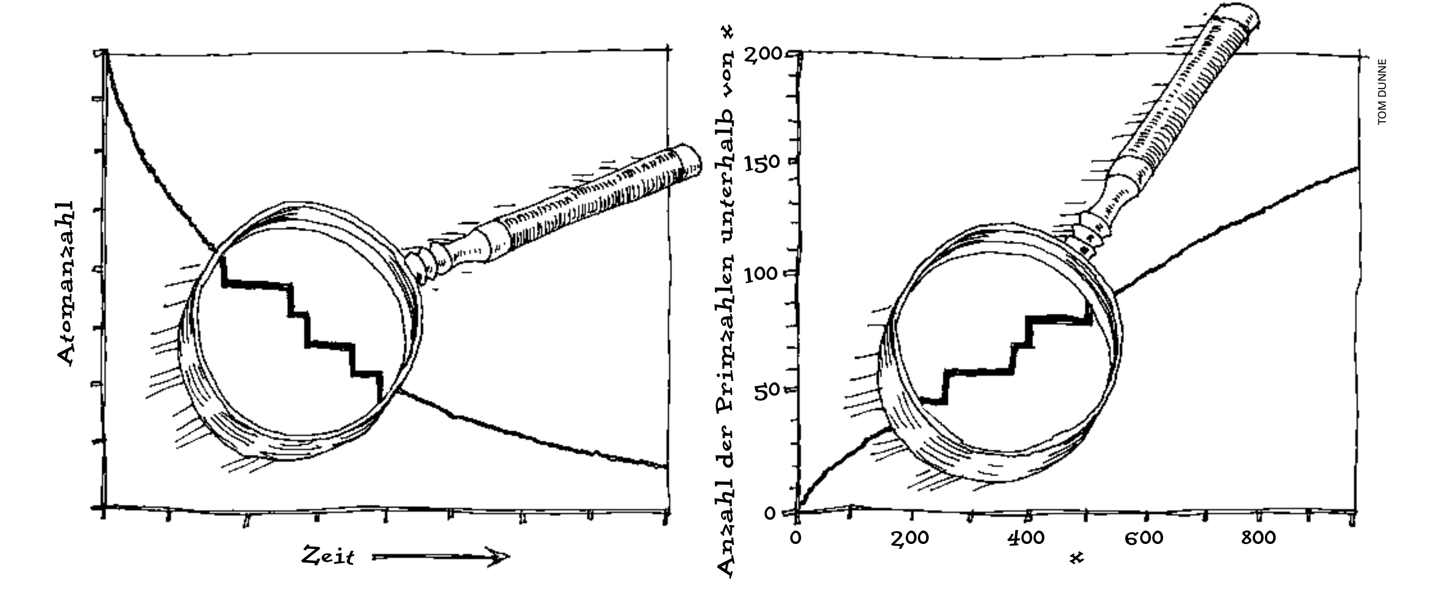
Turing zeigte, dass diese Maschine trotz ihrer Einfachheit und mit einer bescheidenen Anzahl innerer Zustände alles berechnen kann, was überhaupt berechenbar ist – wenn ausreichend Zeit und Speicherplatz zur Verfügung stehen.

Der Zufall in der Mathematik

Nach dem Ausbruch des Zweiten Weltkriegs wandten sich die großen Geister sehr irdischen Anwendungen der Computer zu: Turing der Entschlüsselung geheimer Funksprüche des deutschen Kriegsgegners und von Neumann der Entwicklung der amerikanischen Atombombe. Darüber geriet die Unvollständigkeit formaler Axiomensysteme für eine Weile in Vergessenheit.

Mit dem Ende des Zweiten Weltkriegs verschwand die Generation der Mathematiker, die sich mit diesen tiefen philosophischen Grundlagenfragen der Mathematik beschäftigt hatten, im Wesentlichen von der Bildfläche. Und nun betrat der kleine Gregory Chaitin die Bühne des Geschehens.

In den späten 1950er Jahren las ich als Jugendlicher im Scientific American vom Juni 1956 einen Artikel über Gödel und die Unvollständigkeit. Gödels Resultat faszinierte mich, aber ich verstand es nicht wirklich und kam zu der Überzeugung, dass an der Sache etwas faul sei. Irgendetwas musste noch dahinter stecken. Dann las ich über Turings Resultat, das zweifellos tiefer ging als das



von Gödel, aber ich war immer noch nicht zufrieden. So kam ich auf die verrückte Idee mit dem Zufall.

Ich hatte als Kind auch viel über andere wissenschaftliche Dinge gelesen, vor allem die Grundlagen der Physik: Relativitätstheorie, Kosmologie und ganz besonders Quantenmechanik. Dabei lernte ich, dass die physikalische Welt sich ziemlich verrückt verhält, wenn es um die ganz kleinen Objekte geht. In diesem mikroskopischen Bereich sind die Ereignisse grundsätzlich nicht vorhersagbar, das heißt, es regiert der Zufall (der echte und nicht nur unsere Unwissenheit). Daraufhin kam mir die Frage in den Sinn, wie es denn um den Zufall in der reinen Mathematik bestellt sei (Bild oben). Vielleicht lag ja gerade darin der wahre Grund für die Unvollständigkeit.

Vor allem die elementare Zahlentheorie konnte einen auf entsprechende Gedanken bringen. Denken wir nur an die Primzahlen. Ob eine bestimmte Zahl eine Primzahl ist oder nicht, erscheint ziemlich unvorhersehbar. Es gibt statistische Aussagen wie den so genannten Primzahlsatz, der die relative Häufigkeit von Primzahlen innerhalb eines großen Bereichs ziemlich genau beschreibt. Aber die Verteilung der Primzahlen im Einzelnen sieht schon sehr zufällig aus (siehe meinen Artikel in Spektrum der Wissenschaft 9/1988, S. 62).

Ich kam also auf die Idee, dass diese eng mit der Mathematik verwobene Zufälligkeit der tiefere Grund für die Unvollständigkeit sei. In den 1960er Jahren präsentierte ich ein paar neue Ideen, die ich als »algorithmische Informationstheorie« bezeichnen möchte. Unabhängig von mir entwickelte Andrej N. Kolmogorow (1903–1987) in Moskau eine ähnliche Theorie. Hinter dem bombastischen Namen steckt ein sehr einfacher Grundgedanke. Es geht darum, die Komplexität einer Berechnung zu messen, das heißt den Aufwand, der für die Lösung eines Problems mindestens getrieben werden muss.

Das erste Mal hörte ich von der Idee der Komplexität bei von Neumann. Für Turing war der Computer ein abstraktes mathematisches Konzept gewesen, eine gedachte perfekte Maschine, die niemals Fehler macht und beliebig viel Zeit und Kapazität zur Verfügung hat. Der nächste logische Schritt für die Mathematiker war, zu untersuchen, wie viel Zeit eine Berechnung in Anspruch nimmt – eine Form von Komplexität. Um 1950 rückte von Neumann diese Laufzeitkomplexität ins Zentrum des Interesses und begründete damit ein heute weit entwickeltes Forschungsfeld.

Information und Entropie

Mich interessierte nicht in erster Linie die Rechenzeit, obwohl sie in der Praxis meistens die entscheidende Größe ist, sondern eher die Länge von Computerprogrammen, also die Menge von Information, die ein Computer braucht, um eine bestimmte Aufgabe zu erfüllen. Warum ist das interessant? Weil der Komplexitätsbegriff, der sich auf den Programmumfang bezieht, die »Informationskomplexität«, eng mit dem Entropiebegriff aus der Physik zusammenhängt.

Die Entropie spielt eine herausragende Rolle in den Arbeiten des berühmten Physikers Ludwig Boltzmann (1844–1906) über statistische Mechanik und Thermodynamik. Sie ist ein Maß für die Unordnung, das Chaos, den Zufall in einem physikalischen System. Die Entropie eines Kristalls ist gering, während ein Gas, etwa bei Zimmertemperatur, eine hohe Entropie aufweist.

Der Entropiebegriff steht im Zusammenhang mit der fundamentalen philosophischen Frage, warum die Zeit nur in eine Richtung läuft. Im täglichen Leben ist der Unterschied zwischen Vergangenheit und Zukunft unübersehbar. Ein Glas zerbricht, aber ein Scherbenhaufen setzt sich nicht von selbst zum Glas zusammen. In der Boltzmann'schen Theorie wird das dadurch ausgedrückt, dass die Entropie immer nur zunehmen kann, das heißt, die Unordnung im System wird immer größer. Das ist der wohl ▷

▲ Der Zufall herrscht in der Quantenmechanik. Der scheinbar gleichmäßig und stetig verlaufende Zerfall einer radioaktiven Substanz entpuppt sich bei genauerem Hinsehen als eine Folge diskreter Sprünge (links). Dabei ist nicht vorhersagbar, zu welchem Zeitpunkt das jeweils nächste Atom zerfällt. Die Anzahl der Primzahlen unterhalb einer vorgegebenen Grenze *x* ist grob betrachtet ebenfalls eine glatte, wohldefinierte Kurve. Bei genauerem Hinsehen entpuppt sich die Kurve als aus Sprüngen in unregelmäßigen Abständen zusammengesetzt (rechts). Der genaue Wert der jeweils nächstgrößeren Primzahl kann nicht aus einer allgemeinen Theorie hergeleitet werden.

bekannte Zweite Hauptsatz der Thermodynamik.

Boltzmanns Zeitgenossen sahen keine Möglichkeit, dieses Ergebnis aus der Newton'schen Physik herzuleiten. Schließlich ist in einem Gas, wo die Atome durcheinander wirbeln wie Billardkugeln, jedes Ereignis in der Zeit umkehrbar. Wenn es möglich wäre, für eine kurze Zeit zu filmen, was sich in einem kleinen Gasvolumen abspielt, könnte man hinterher nicht entscheiden, ob der Film vorwärts oder rückwärts läuft. Das steht im Widerspruch zu Boltzmanns Theorie und der täglichen Erfahrung, die besagen, dass die Zeit sehr wohl eine festgelegte Richtung hat: Ein System, das sich anfangs in einem sehr geordneten Zustand befindet, entwickelt sich im Verlauf der Zeit in einen sehr ungeordneten, chaotischen Zustand. In dem Fall, dass das System das ganze Universum ist, hat dieser Endzustand einen schrecklich dramatischen Namen: »Wärmetod«.

Interessanterweise gibt es nun einen Zusammenhang zwischen dem Grad von Unordnung in einem physikalischen System und der Größe eines Computerprogramms. Um zu beschreiben, wo sich alle Atome eines Gases befinden, braucht es ein sehr großes Programm, während für einen Kristall auf Grund seiner regulären Struktur ein sehr viel kleineres Programm ausreicht. Somit sind die Entropie und die Informationskomplexität eines Computerprogramms – die man heute Kolmogorow-Chaitin-Komplexität oder auch Kolmogorow-Komplexität nennt – eng miteinander verknüpft: Die Entropie eines Systems ist im Wesentlichen die Länge des kürzesten Programms, welches den Zustand des Systems beschreibt.

Dieser Begriff von Komplexität ist wiederum eng verknüpft mit der Philosophie der wissenschaftlichen Methode. Der Informatiker Ray Solomonoff hat das auf einer Tagung im Jahr 1960 zur Sprache gebracht; ich erfuhr davon erst einige Jahre später, als ich selbst schon zu ähnlichen Schlüssen gekommen war. Unter mehreren Theorien, die dasselbe leisten, ist stets die einfachste vorzuziehen. Dieses Prinzip ist als »Ockhams Rasiermesser« bekannt, denn schon der mittelalterliche Gelehrte Wilhelm von Ockham (um 1285–1349) unternahm es, den Wildwuchs unter wissenschaftlichen Theorien auszulichten. Was ist nun in unserem Kontext eine Theorie? Ein Computerprogramm, das Beobachtungen voraussagt. Und die Aussage, dass die einfachste Theorie die beste ist, übersetzt sich in die Feststellung, dass unter mehreren Computerprogrammen gleicher Funktion das kürzeste die beste Theorie liefert.



ARCHIV DES INSTITUTE OF ADVANCED STUDY

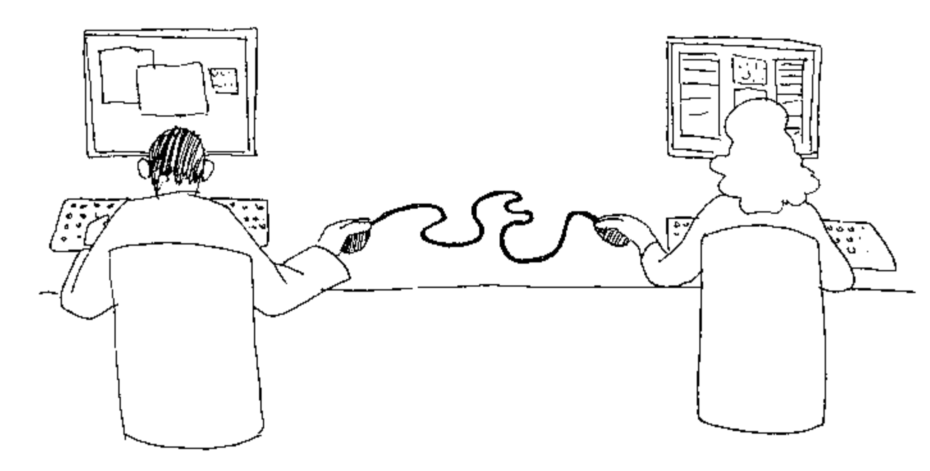
Kurt Gödel und Einstein wurden in Princeton gute Freunde, und das, obgleich Einstein die entscheidende Rolle des Zufalls in der Physik und in der Mathematik, die Gödels Arbeiten zu erkennen halfen, nie akzeptiert hat.

Zufall ist, wenn man es nicht kürzer sagen kann

Was ist, wenn es keine wirklich gute Theorie gibt? Wenn das kürzeste Programm, das zur Reproduktion einer bestimmten Menge von Beobachtungsdaten fähig ist, genauso groß ist wie die Datenmenge? Dann hilft keine Theorie; die Daten sind nicht komprimierbar, sondern zufällig. Die Qualität einer Theorie misst sich daran, inwieweit sie in der Lage ist, die Beobachtungsdaten zu komprimieren, das heißt durch eine wesentlich kleinere Menge von theoretischen Voraussetzungen und Deduktionsregeln zu ersetzen, aus denen die Daten rekonstruierbar sind.

Auf diese Weise kann man Zufall als etwas definieren, das nicht weiter komprimierbar ist. Die einzige Möglichkeit, ein vollkommen zufälliges Objekt zu beschreiben, besteht in der vollständigen Aufzählung aller seiner Daten. Da es keine Struktur gibt, ist eine kürzere Darstellung nicht möglich. Das andere Extrem ist ein Gegenstand mit einer sehr regulären Struktur, zum Beispiel die millionenfache Wiederholung der Ziffernfolge 01. Das ist ein sehr großes Objekt mit einer sehr kurzen Beschreibung.

Wenn man sich nun näher mit der Länge von Computerprogrammen beschäftigt – Informationskomplexität statt Laufzeitkomplexität –, geschieht etwas sehr Merkwürdiges: Wo man auch hinschaut, stößt man auf das Phänomen der Unvollständigkeit. Das geschieht schon mit der ersten Frage, die sich im Rahmen meiner Theorie stellt. Man



misst ja die Komplexität eines Gegenstands durch die Länge des kürzesten Programms, das noch zu seiner Beschreibung fähig ist. Aber wie kann man sicher sein, dass man wirklich das kürzeste Programm gefunden hat? Gar nicht! Erstaunlicherweise übersteigt die Aufgabe, das kürzeste Programm zu finden, die Möglichkeiten mathematischen Schließens.

Die Begründung ist etwas verwickelt, deshalb möchte ich an dieser Stelle nur das Endergebnis vorstellen. Es ist einer meiner Lieblingssätze über Unvollständigkeit: Hat man Axiome im Umfang von *n* Bits gegeben, so ist es nicht möglich zu beweisen, dass ein Programm das kürzeste ist, wenn es länger ist als *n* Bits. Genauer: Zu den Axiomen und Schlussregeln einer Theorie gehört ein Programm – Hilberts »mechanisches Verfahren« –, das die Korrektheit eines vorgelegten Beweises, sprich der Herleitung eines Satzes aus den Axiomen vermittels der Schlussregeln, überprüft. Die Länge *n* (in Bits) dieses Programms ist die kritische Länge. Für ein Programm, das länger ist als *n* Bits, ist es nicht möglich zu beweisen, dass es das kürzestmögliche Programm zur Beschreibung eines bestimmten Gegenstands ist.

Es stellt sich also heraus, dass man im Allgemeinen die Informationskomplexität eines Gegenstands gar nicht berechnen kann, denn dazu müsste man die Länge des kürzesten Programms kennen, das den Gegenstand berechnet. Das ist unmöglich, wenn das Programm länger ist als die Informationsmenge *n* der Axiome. Und das ist praktisch immer der Fall, denn die Anzahl an Axiomen, die Mathematiker in der Regel benutzen, ist ziemlich übersichtlich, da sie sonst keiner glauben würde; *n* ist also eine relativ kleine Zahl.

Es gibt einen unendlich großen Kosmos mathematischer Wahrheiten – eine unendliche Menge an Information –; aber jedes gegebene Axiomensystem kann nur einen winzigen, endlichen Teil davon erfassen, einfach weil es zu klein ist. So gesehen ist Gödels Unvollständigkeitssatz keineswegs kompliziert und mysteriös, sondern im Gegenteil völlig natürlich und unvermeidlich.

Und wie geht's weiter?

In nur drei gedanklichen Schritten sind wir einen weiten Weg gegangen: von Gödel, der uns mit der schockierenden Tatsache konfrontiert, dass logisches Schließen seine Grenzen hat, über Turing, der uns diese Grenzen deutlich plausibler macht, bis zur Informationskomplexität, die uns wiederum unausweichlich mit der Unvollständigkeit, der Begrenztheit jeglichen mathematischen Denkens, konfrontiert.

An dieser Stelle kommt meistens die Gegenfrage: »Das ist ja alles sehr schön, und die algorithmische Informationstheorie ist sicher eine gute Theorie; aber wo ist ein Beispiel für eine Aussage, die tatsächlich die Möglichkeiten mathematischen Schließens überfordert?« Viele Jahre lang habe ich auf diese Frage geantwortet: »Vielleicht Fermats letzter Satz.« Doch dann passierte es. Im Jahr 1993 präsentierte Andrew Wiles einen Beweis. Zunächst enthielt er einen Fehler, aber mittlerweile ist alle Welt davon überzeugt, dass er in seiner letzten Fassung korrekt ist. Zu dumm. Mit der algorithmischen Informationstheorie kann man zwar nachweisen, dass es eine Menge unbeweisbarer Sätze gibt, aber man bekommt keine Aussagen über konkrete mathematische Fragestellungen.

Der Unvollständigkeitssatz hat ja schon etwas Pessimistisches an sich. Wenn man ihn wörtlich nimmt, könnte man meinen, es sei in der Mathematik keinerlei Fortschritt möglich. Wie kommt es, dass die Mathematiker trotzdem so erfolgreich arbeiten? Vielleicht wird es der nächsten Generation junger Mathematiker gelingen, den Grund dafür zu finden. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



Gregory J. Chaitin ist Mathematiker am Watson-Forschungszentrum der IBM in Yorktown Heights (US-Bundesstaat New York) und Gastprofessor an den Universitäten Buenos Aires und Auckland. Seit 35 Jahren ist er der prominenteste Vertreter der algorithmischen Informationstheorie, die er als Jugendlicher erfand. Seine jüngste Weiterentwicklung der Theorie betrifft Prognosen über die Länge echter Computerprogramme.

Dieser Artikel ist ein Auszug aus seinem Buch »Conversations with a mathematician«, der seinerseits einen 1999 an der Universität von Massachusetts in Lowell gehaltenen Vortrag wiedergibt.

Kurt Gödel. Von Gianbruno Guerrerio. Spektrum der Wissenschaft Biografie 1/2002

Der Gödelsche Beweis. Von E. Nagel und J. R. Newman. Oldenbourg, München 2001

Die Entdeckung des Unmöglichen. Von John D. Barrow. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 2001

Gödel, Escher, Bach. Von Douglas R. Hofstadter. 8. Auflage, dtv 2001

Das logische Dilemma. Leben und Werk von Kurt Gödel. Von W. Dawson jr. Springer, Heidelberg 1999

Zufall und Chaos. Von David Ruelle. Springer, Heidelberg 1992

Conversations with a mathematician. Von Gregory J. Chaitin. Springer, Heidelberg 2002

Exploring randomness. Von Gregory J. Chaitin. Springer, Heidelberg 2001

Gödel: a life of logic. Von John L. Casti und Werner DePauli. Perseus, Cambridge (Massachusetts) 2000

The unknowable. Von Gregory J. Chaitin. Springer, Heidelberg 1999

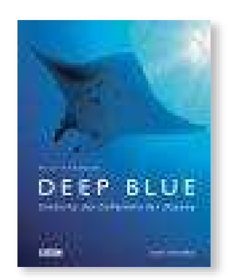
The limits of mathematics. Von Gregory J. Chaitin. Springer, Heidelberg 1998

Information, randomness and incompleteness. Von Gregory J. Chaitin. World Scientific, 1990

Algorithmic information theory. Von Gregory J. Chaitin. Cambridge University Press, 1987

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

REZENSIONEN



MEERESBIOLOGIE

Alastair Fothergill, Andy Byatt (Regie und Drehbuch)

Deep Blue

Entdecke das Geheimnis der Ozeane

Dokumentarfilm, 90 Minuten. Kinostart 29. Januar 2004

Buch zum Film von Philip Wilkenson. Aus dem Englischen von Marion Pausch. Gerstenberg, Hildesheim 2004. 64 Seiten, € 12,90

Seelöwen tummeln sich am Strand im blauen Wasser, tollen elegant und unbeschwert herum. Musik brandet auf im Gleichtakt mit den Meereswellen. Plötzlich bricht ein riesiger Kopf hervor: Ein Schwertwal verwandelt die Idylle in einen Ort der Panik, spielt mit seinen Opfern. Meterhoch wird ein Seelöwenjunges in die Luft geschleudert.

Der Film »Deep Blue« führt den Zuschauer auf eine großartige Rundreise, von der Antarktis über die weiten Ozeane bis kilometerweit hinunter in die finsterste Tiefsee. Verbunden sind diese verschiedenen Orte immer wieder durch beeindruckend in Szene gesetzte Meeresbewohner, die mal majestätisch, mal verspielt durch das Wasser gleiten: große und kleine Wale, elegante Delfine, schwebende Rochen, flirrende Fischschwärme; und dann und wann vereinen sich Luft und Wasser, wenn etwa Massen von Seevögeln im Sturzflug nach Beute tauchen.

Erst durch das Zusammenspiel mit der Musik werden die Emotionen so richtig angesprochen. Wenn sich an einem einsamen Strand Unmengen von Krabben Sand in den Mund schaufeln und ihn zu Kugeln geformt wieder ausspucken, bis – durch Zeitraffer auf Sekunden verkürzt – die Gegend über und über mit Sandkügelchen bedeckt ist, dann ist der Anblick allein bereits sehenswert. Aber erst die heißen Samba-Rhythmen geben diesem Tanz die richtige Würze. Ein Tiefseefisch gleitet lauernd durch die Gegend – ein Paukenschlag, und seine Dolchzähne haben ein leuchtend rotes Opfer aufgespießt.

Eisbären warten an ins Eis gebrochenen Löchern auf Beluga-Wale, die gezwungen sind, dort Luft zu holen. Schwertwale jagen in stundenlanger Hatz einer Grauwalkuh ihr Junges ab. Solche Szenen machen die Dramatik des Films aus. Doch auch die ruhigeren Szenen lassen miterleben. Wenn sich Massen von Pinguinen in der arktischen Kälte zusammendrängen, dann überkommt auch den Kinozuschauer ein Frösteln. Mein persönliches Highlight sind allerdings die Aufnahmen aus der Tiefsee. So fremd und so faszinierend wirken diese Welt und ihre Bewohner. Winzige leuchtende Lebewesen wie der Flohkrebs, der sich sein Licht selbst erzeugt, oder der filigrane Tiefsee-Muschelkrebs schweben durch das Wasser. Monsterhaft anmutende Fische (Bild links unten) werden in einer Umgebung präsentiert, die an die Oberfläche fremder Planeten erinnert.

Für »Deep Blue« wurden die atemberaubendsten Sequenzen aus der achtmal einstündigen Dokumentarserie der BBC »The Blue Planet« zusammengestellt (die deutsche Version wurde im vergangenen Sommer unter dem Namen »Unser blauer Planet« ausgestrahlt). Der Aufwand für diese Serie war enorm: An über 200 Drehorten wurden mehr als 7000 Stunden Material aufgenommen – über einen Zeitraum von fünf Jahren.

Der Komponist der Filmmusik ist kein anderer als der Engländer George Fenton, der schon Klassiker wie »Gandhi« und »Cry Freedom« vertonte und insgesamt fünf Oscar-Nominierungen und diverse Preise einheimste. Eingespielt wurde das Ganze von den Berliner Philharmonikern, die sich das erste Mal seit ihrem Bestehen für ein solches Projekt einspannen ließen.

Der Film ist dazu gemacht, die Sinne anzusprechen, nicht unbedingt das Gehirn. Um den Fluss der Bilder und der Musik nicht zu stören, haben die Filmemacher weitgehend auf die begleitenden Informationen der Fernsehserie verzichtet; die inhaltsarmen Kommentare des Erzählers sind im Wesentlichen entbehrlich.

Am Ende von »Deep Blue« war ich tief beeindruckt; nur bleibt nach dem Rausch das vage Gefühl, es hätte ein bisschen mehr haften bleiben dürfen. Dafür bietet sich das parallel zum Film erscheinende Buch an. Auch hier wurde der Fokus auf die wunderbaren Bilder gelegt; aber der Begleittext liefert doch einige der schmerzlich vermissten Sachinformationen. Die vollständige Fernsehserie (DVD und VHS) und das Begleitbuch zur Serie sind übrigens auch im Handel erhältlich.

Elke Reinecke

Die Rezensentin ist Redakteurin bei wissenschaft-online in Heidelberg.



DAVID SHALE / BBC

Der bizarre Anglerfisch sieht aus wie für einen Horrorfilm angefertigt – ist aber echt.



MEDIZIN

Thomas Häusler

Gesund durch Viren

Ein Ausweg aus der Antibiotika-Krise

Piper, München 2003. 275 Seiten, € 14,90

Es ist an der Zeit, die Bücher über die Infektionskrankheiten zu schließen«, verkündete 1969 William H. Stewart, Surgeon General der Vereinigten Staaten, »der Krieg gegen die Seuchen ist vorbei.« Selten ist ein medizinisches Dogma so rasch ad absurdum geführt worden wie die Aussage des ranghöchsten Amtsarztes der USA. Tatsächlich verschwanden die Infektionskrankheiten in den 1960er Jahren nur vorübergehend aus dem Blickwinkel der Öffentlichkeit, um sich zwanzig Jahre später mit Vehemenz zurückzumelden.

So verdoppelte sich nach dem politischen Zusammenbruch der Sowjetunion dort die Zahl der Schwindsüchtigen innerhalb von nur sieben Jahren. Heute ist in der Umgebung des Aralsees einer von 300 Bewohnern an Tuberkulose erkrankt – eine dramatische hohe Zahl. In New York wütete von 1972 bis 1992 eine Epidemie multiresistenter Mykobakterien mit rund 400 Neuinfektionen pro Jahr, deren Bekämpfung rund eine Milliarde Dollar kostete. Nosokomiale Infektionen – Ansteckungen im Krankenhaus – und multiresistente Erreger, Begriffe, mit denen vor wenigen Jahren nur Experten etwas anfangen konnten, sind heute Themen der Publikumspresse. Nicht zu Unrecht, denn allein in Deutschland sterben jährlich 20 000 Menschen an einer nosokomialen Infektion.

Die Aussichten für die Zukunft sind noch trüber. Während es rund fünfzig Jahre dauerte, bis 95 Prozent aller Bakterien der Art *Staphylococcus aureus* gegen Penizillin resistent waren, brauchen so genannte Problemkeime jetzt nur noch ein paar Jahre, um gegen eine völlig neue Antibiotika-Klasse gewappnet zu sein. Überdies hat die pharmazeutische Industrie lange nicht mehr so viele Erfolg versprechende Substanzen in der Forschungspipeline wie noch vor einer Dekade. Gleichzeitig steigt aber der Bedarf: Immer mehr Menschen müssen wegen einer Immunschwäche oder als Empfänger von Organtransplantaten vor einer Infektion geschützt werden.

Neue Hoffnung verspricht da eine Therapie, die wesentlich älter ist als Penizillin: die Behandlung mit Bakteriophagen. Am 2. August 1919 flößte deren Entdecker, der Frankokanadier Felix d'Herelle, einem todkranken Jungen am Pariser Institut Pasteur eine trübe Suppe von Shigellenphagen ein und heilte ihn so von der Ruhr. Nach einem frühen, weltweiten Boom führt die Therapie heute nur noch ein Schattendasein in der ehemaligen Sowjetrepublik Georgien und gerät erst jetzt im Westen wieder in den Blickpunkt, auch wenn viele Infektiologen noch skeptisch sind.

Dieser Paradigmenwandel ist der Hintergrund für ein ungewöhnlich gut recherchiertes, hervorragend geschriebenes und wissenschaftlich fundiertes Buch des Schweizer Journalisten Thomas Häusler. Von den Anfängen bis zur Gegenwart beschreibt der promovierte Biochemiker alle Aspekte eines Konzepts, dessen therapeutisches Potenzial in Zeiten von Aids und Sars nicht leicht zu vermitteln ist.

Viren gegen Bakterien – das Konzept ist in Zeiten von Aids und Sars nicht leicht zu vermitteln

Bakteriophagen sind nämlich extrem gefährliche Viren, allerdings mit dem feinen Unterschied, dass sie sich auf Bakterienzellen spezialisiert haben und tierischen Zellen nichts anhaben können. Entdeckt ein Phage ein Bakterium, zu dem er den richtigen Schlüssel besitzt – sprich: das auf seiner Oberfläche geeignete Rezeptoren hat, an die er mit seinen tentakelartigen Fortsätzen andocken kann –, so schleust er binnen Minuten sein Erbgut in die Bakterienzelle. Mit deren biochemischem Apparat werden anschließend Hunderte von Phagenkopien erstellt. Besondere Enzyme (Holine und Lysine) brechen die Zellwand von innen auf, das Opfer geht zu Grunde, und die freigesetzten jungen Phagen stürzen sich wie eine Meute hungriger Wölfe auf noch vorhandene Bakterien.

Die Vorteile der Therapie liegen auf der Hand. Bakteriophagen sind ungemein spezifische Parasiten und schädigen – im Gegensatz zu Antibiotika – nicht die nützlichen Bakterien, die in und auf dem Körper leben. Auf Grund ihrer Wirkungsweise können sie keine Resistenzen induzieren, und ist ein Erreger primär unempfindlich, so gibt es höchstwahrscheinlich ein anderes Virus, das als Bakterienkiller einspringt. Phagen sind »intelligente« Medikamente: Sie vermehren sich just dort, wo sie gebraucht werden (während Antibiotika häufig gar nicht dorthin gelangen, wo sie wirken sollen).

Die hohe Spezifität, mit der Phagen sich ihre bakteriellen Opfer suchen, ist gleichzeitig auch ihre therapeutische Achillesferse. Entweder muss der Infektiologe einen Cocktail aus sehr vielen verschiedenen Phagen zur Hand haben, oder ein zum Erreger des Patienten exakt passender Phage muss in mühevoller mikrobiologischer Feinarbeit »maßgeschneidert« und in Massen hergestellt werden. In beiden Fällen tun sich die Zulassungsbehörden schwer, solchermaßen in Handarbeit hergestellte Anti-Infektiva als Medikamente anzuerkennen.

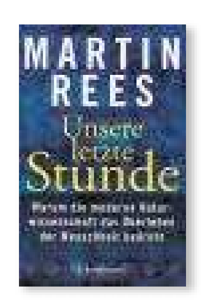
Für chronische Infektionen auf äußeren und inneren Körperoberflächen durch multiresistente Erreger, denen mit gängigen Methoden nicht beizukommen ist, könnte die Phagentherapie zu eine Art Wunderarznei werden. Überdies könnten Phagen das Ende der Antibiotika-Gabe in der Massentierhaltung einläuten.

Quer durch das Buch werden Interviews mit Forschern, die an vorderster Front tätig sind, geschickt verknüpft mit der Schilderung bewegender Patientenschicksale. Hervorragend ist auch der mittlere Teil des Buchs mit den Irrungen und Wirrungen der Phagentherapie zwischen 1930 und 1990. Hier zeigt der Journalist Häusler auf, welchen Einfluss politische Ereignisse auf die medizinische Forschung haben – vom »großen vaterländischen Krieg« Russlands gegen Nazi-Deutschland über den Zusammenbruch der Sowjetunion bis hin zum 11. September 2001. Eine lange Liste von Fußnoten, ein ausführlicher Quellennachweis und zahlreiche instruktive Abbildungen ergänzen den Text vorzüglich.

Ein Buch zu einem brisanten Thema, wie man es nicht besser machen kann.

Hermann Feldmeier

Der Rezensent ist Arzt für Mikrobiologie und Infektionsepidemiologie sowie Professor für Tropenmedizin an der Freien Universität Berlin.



WELTUNTERGANG

Martin Rees

Unsere letzte Stunde

Warum die moderne Naturwissenschaft das Überleben der Menschheit bedroht

Aus dem Englischen von Friedrich Griese.
C. Bertelsmann, München 2003. 222 Seiten, € 19,90

Nuklearer Megaterror, absichtlich oder versehentlich freigesetzte Killerviren, Weltuntergangsexperimente, bei denen die Erde zu einem hyperdichten Klumpen kollabiert: Das Überleben der Menschheit hängt an einem seidenen Faden. Noch nie war es so gefährdet wie jetzt, im 21. Jahrhundert. Die Chance, dass die Menschheit dieses Jahrhundert überstehen wird, ist vielleicht nicht höher als fünzig zu fünzig.

Das ist die zentrale These des vorliegenden Buchs. Das Ganze klingt zunächst nach Weltuntergangsspinnerei, doch Martin Rees ist nicht irgendjemand. Er gilt als einer der weltweit führenden Astrophysiker, ist Professor in Cambridge, Mitglied der National Academy of Sciences der USA und gehört der Russischen Akademie der Wissenschaften an.

Entgegen dem Titel »Unsere letzte Stunde« geht es Rees nicht darum, die Sterbestunde der Menschheit zu besingen, sondern um eine Risikoabschätzung für die Zukunft. Wie sicher leben wir eigentlich? Und wie viel persönliche, gesellschaftliche und wissenschaftliche Freiheit können wir uns künftig noch leisten?

Rees argumentiert: Heutzutage können einige wenige oder gar einzelne Personen Vernichtungen beängstigenden Ausmaßes verursachen. Um eine globale Epidemie mit Millionen Toten auszulösen, muss nur ein Terrorist eine Ampulle mit tödlichen Viren auf einem belebten Flughafen öffnen – oder ein Laborant versehentlich Killerviren freisetzen. Der wissenschaftliche Fortschritt hat die (potenzielle) Macht des Einzelnen ins Unermessliche gesteigert.

Aber Gefahr, meint Rees, droht auch ganz unmittelbar vom Wissenschaftsbetrieb selbst. Bei Experimenten in Teilchenbeschleunigern werden Extrembedingungen geschaffen, die in der Natur nie vorkommen. Könnte ein solches Experiment in einer Art Kettenreaktion zur Vernichtung der Erde führen, könnte es gar das Raum-Zeit-Gefüge selbst zerreißen? Eine bizarre Überlegung, möchte man meinen. Tatsächlich jedoch haben sich Wissenschaftler am Cern und am amerikanischen Brookhaven-Beschleuniger damit beschäftigt, wie wahrscheinlich es ist, dass es bei Beschleuniger-Experimenten zur Vernichtung der Erde kommt. Sie ermittelten bei zehnjähriger Versuchslaufzeit eine Wahrscheinlichkeit von 1 : 50 Millionen. Doch ein sehr kleines Risiko mal einem unermesslich großen Schaden wäre immer noch ein unakzeptabel hoher Schadenserwartungswert.

Wird durch Beschleuniger-Experimente die Welt untergehen? Die Wahrscheinlichkeit wurde mit 1 : 50 Millionen berechnet

Es sind solche Überlegungen, die das Buch lesenswert machen. Der Autor bemüht indes nicht nur Worst-Case-Szenarien, um mögliche Gefahren für die Menschheit zu projizieren. Auf sachliche und informative Weise analysiert er natürliche Risiken wie zum Beispiel Asteroideneinschläge, Erdbeben und Supervulkanismus. Überdies, mahnt er, sägen die Erdbewohner selbst an dem Ast, auf dem sie sitzen: durch die Zerstörung der Natur, die Klimaerwärmung infolge des Treibhauseffekts und die Ausrottung von Tier- und Pflanzenarten. Hinzu gesellten sich derzeit schwer abschätzbare Risiken, die aus der globalen Vernetzung und der Gentechnik resultieren. Immer wieder stellt Rees die Einmaligkeit und den Wert des Lebens heraus.

Manche Kapitel vermitteln auf verblüffende Weise völlig neue Sichtweisen. So zitiert Rees ein Argument eines befreundeten Philosophen namens Brandon Carter: ein simples statistisches Gedankenspiel mit dem Ergebnis, dass der Untergang der Menschheit wahrscheinlich schon bald bevorsteht. Ein Fehler im Gedankengang ist zunächst nicht zu sehen.

Die 5x5-Rezension des Monats von wissenschaft-online



J. Richard Gott

Zeitreisen in Einsteins Universum

Rowohlt Taschenbuch Verlag, Reinbek 2003,
336 Seiten, € 9,90

Was sagt die Wissenschaft – vornehmlich die Physik – zum Thema Zeitreisen? Im Prinzip spricht nichts dagegen, meint der Astrophysiker J. Richard Gott von der Princeton University.

Sein Buch bietet einen ergiebigen Streifzug durch die Physik der Zeitreise. An manchen Stellen muss sich der interessierte Laie zwar etwas anstrengen, doch erfährt er dafür, welche Bedeutung scheinbar verspielte Gedanken für die »harte« Wissenschaft haben können. Gotts Beschreibungen und Beispiele sind amüsant und aufschlussreich zu lesen. In seinem Plauderstil gerät der abstrakte Stoff zur unterhaltsamen Bettlektüre – etwa wenn er den Raum um einen kosmischen String mit einer angeknabberten Pizza vergleicht.

Aus der Rezension von Olaf Fritsche

5x5 Rubriken	Punkte 1 • 2 • 3 • 4 • 5
Inhalt	■■■■
Didaktik	■■■■
Suchen/Finden	■■■■
Lesespaß	■■■
Preis/Leistung	■■■■
Gesamtpunktzahl	19

Den kompletten Text und zahlreiche weitere Rezensionen von wissenschaft-online finden Sie im Internet unter **http://www.wissenschaft-online.de/5x5**

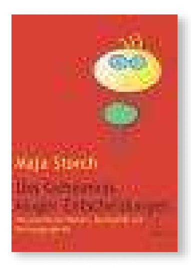
Freilich hat Rees' Werk auch Schwächen. Die aufgeführten Argumente belegen nicht schlüssig, warum der Autor die Überlebenschance der Menschheit ausgerechnet bei 50:50 ansetzt. Wurde diese schockierende Schätzung vielleicht mit Blick auf die Verkaufszahlen geäußert?

Vom Einstieg des Buchs, namentlich von den ersten beiden Kapiteln, sollte man sich nicht abschrecken lassen: Hier bewegt sich die Spekulation des Öfteren »außerhalb des visionären Grenzbereichs« – auf Dauer eine ermüdende Übung. Später im Buch bringt Rees gelegentlich Altbekanntes, zum Beispiel zu den Anfängen des Lebens oder den Grenzen des menschlichen Geistes, oder er verliert den Bezug zu seinem Thema, etwa bei seinen Überlegungen zur Existenz außerirdischen Lebens. Nüchterne Naturen werden nicht viel Gefallen an dem Werk finden – zu häufig bewegt sich die Argumentation auf der Ebene von »könnte«, »würde« und »hätte«. Fantasievolle Zeitgenossen kommen da wohl eher auf ihre Kosten.

Das Buch ist spannend und allgemein verständlich geschrieben. Die Lektüre gerät regelrecht zum Lesevergnügen – trotz des düsteren Themas.

Frank Schubert

Der Rezensent ist promovierter Biophysiker und Wissenschaftsjournalist in Berlin.



PSYCHOLOGIE

Maja Storch

Das Geheimnis kluger Entscheidungen

Von somatischen Markern, Bauchgefühl und Überzeugungskraft

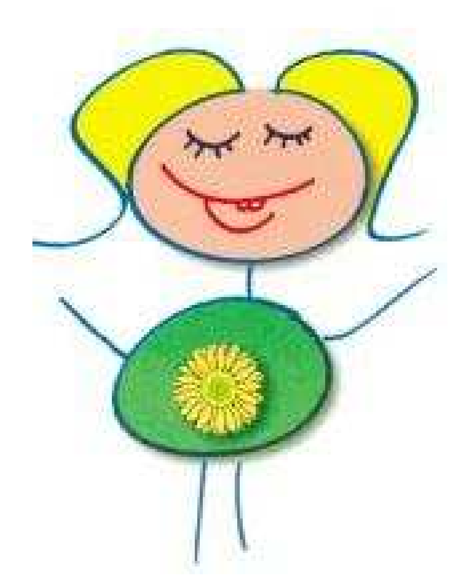
Pendo, Zürich 2003. 119 Seiten, € 14,90

Zu einer klugen Entscheidung kommt man weder mit dem Modell des *Homo oeconomicus*, des rationalen und emotionslosen Vernunftmenschen, noch indem man sich allein auf spontane Gefühlsneigungen verlässt. Vielmehr liege das Geheimnis in einer Integration der Vernunft und der Gefühle, so Maja Storch, promovierte Psychoanalytikerin, Trainerin und Mitarbeiterin an der Universität Zürich. Dies führe nicht nur zu klugen Entscheidungen, sondern auch zu mehr psychischem Wohlbefinden.

Im Theorieteil ihres Buchs beschreibt Maja Storch die Arbeiten des amerikanischen Gehirnforschers Antonio R. Damasio. Danach verwendet der Mensch in Entscheidungssituationen so genannte somatische Marker. Der Körper (griechisch *soma*) »markiert« eine Szene mit einer positiven oder negativen Empfindung und vermittelt dadurch elementare Informationen, zum Beispiel ob man sich einem Objekt oder einer Situation annähern oder sie vermeiden soll. Diese Erfahrungen bleiben lebenslang als körperliche Empfindungen oder Gefühle im so genannten emotionalen Erfahrungsgedächtnis gespeichert. Somatische Marker können sich in vielen Formen äußern, als Schmetterlinge im Bauch, als Engegefühl in der Brust und so weiter.

Wer es schafft, diese somatischen Marker mit der vernunftmäßigen Bewertung der Situation zu koordinieren, dem steht der Weg zu klugen Entscheidungen offen. Laut der Autorin unterscheiden Menschen sich darin, inwieweit sie die somatischen Marker wahrnehmen und für ihre Entscheidungen nutzen. Darauf aufbauend beschreibt der zweite Teil des Buchs, wie man kluges Entscheiden trainieren kann, indem man somatische Marker spüren lernt und schrittweise in die Entscheidungsfindung einbindet.

Dieser Teil sollte nun eigentlich am interessantesten sein: Man möchte schon wissen, wie man die bewusste Vernunftbewertung mit der gefühlsmäßigen, unbewussten Bewertung in Übereinstimmung bringen kann. Aber hier enttäuscht die Autorin, indem sie sich auf das beschränkt, was sie am Anfang des Buchs selbst kritisiert: eine Art loser Vorschlagssammlung. Storch beschreibt drei Techniken aus dem Fundus der Psychotherapie, mit denen man die Emotionen dazu bringt, dem Vorschlag der besser wissenden Vernunft zu folgen. So soll man sich beispielsweise das gewünschte Ziel vorstellen und sich über das entstehende verlockende Zukunftsbild einen positiven somatischen Marker zu der Aufgabe zulegen. ▷



Bildhafte Beschreibung somatischer Marker: »Es fühlt sich an, als hätte ich eine Sonnenblume im Bauch!«

▷ Diese Techniken mögen sogar einen gewissen Erfolg haben; aber sie setzen bereits voraus, dass die Vernunft die Instanz mit der besseren Einsicht in die Dinge ist. Damit verfehlt die Autorin ihr eigenes anfangs gesetztes Ziel, die beiden Instanzen gleichberechtigt in die Entscheidungsfindung aufzunehmen; die Emotion gilt nicht als – möglicherweise sehr zuverlässige – Informationsquelle, sondern wird dazu gebracht, der Vernunft zu folgen. Außerdem geht es bei den Techniken gar nicht mehr um Entscheidungen im ursprünglichen Sinn, sondern um deren Umsetzung. Sie sollen nur noch die Motivation für eine Handlung erhöhen, für die man sich mit der Vernunft bereits entschieden hat.

Die hervorgehobenen Merksätze, die das ganze Buch durchziehen, erleichtern das Lesen, laufen aber häufig auf sehr gewagte Verallgemeinerungen hinaus. So stellt Storch das Ergebnis der Gehirnforschung, dass nicht alle Vorgänge des Gehirns dem Bewusstsein zugänglich sind, als eine explizite Bestätigung für die Existenz eines Unbewussten dar, so wie es Sigmund Freud konzeptualisiert hat. Hier werden auf verwirrende Weise Begriffe durcheinander geworfen.

Am Ende des Buchs reißt die Autorin sehr knapp neue, breite Konzepte an, so die im Untertitel versprochene Überzeugungskraft, Selbstregulation oder Motivation, lässt aber die langjährige psychologische Forschungstradition mit ihren Theorien und Befunden außen vor. Einziges Literaturzitat aus dieser Richtung ist eine aktuelle Arbeit von Julius Kuhl. ▷

PREISRÄTSEL

Auf Stoß geklebt

Von Pierre Tougne



Paula möchte aus einem beliebig großen Blatt Papier einen Würfel der Kantenlänge 1 dm basteln. Sie klebt dabei die Ränder stets auf Stoß.

Paul schlägt ihr ein klassisches Schnittmuster vor (Bild rechts oben). Aber Paula sind 1,40 m Klebefuge zu viel.

Finden Sie das Schnittmuster mit der kürzestmöglichen Klebefuge. Keine Tricks mit doppelten Papierlagen oder Stabilisierung durch Falten!

Schicken Sie Ihre Lösung in einem frankierten Brief oder auf einer Postkarte an Spektrum der Wissenschaft, Leserservice, Postfach 104840, D-69038 Heidelberg.

Unter den Einsendern der richtigen Lösung verlosen wir drei kinetische Skulpturen »Jupiter«. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen. Es werden alle Lösungen berücksichtigt, die bis Dienstag, 17. Februar 2004, eingehen.

Lösung zu »Wandern auf Zielos« (Dezember 2003)

»Mit der ersten Frage einen Hirten erkennen, der nicht wankelmütig antwortet, und diesem dann eine zweite Frage stellen, sodass die Antwort den Weg weist.« Das ist die Strategie von Manfred Müller-Späth aus Ahrensburg.

Der Wanderer Paul bezeichnet die Hirten in Gedanken mit *A*, *B* und *C* und fragt dann den Hirten *A*:

»Sagt dieser Hirte (Paul zeigt auf *B*) auf lange Sicht häufiger die Wahrheit als jener (Paul zeigt auf *C*)?«

Falls *A* mit »Ja« antwortet, sind drei Fälle zu unterscheiden:

▶ Wenn *A* stets die Wahrheit sagt, ist *B* der Wankelmütige und *C* der Lügner.

▶ Wenn *A* stets lügt, ist *B* der Wankelmütige, und *C* sagt stets die Wahrheit.

▶ Wenn *A* der Wankelmütige ist, so lügt *C* stets oder sagt stets die Wahrheit.

In jedem der drei Fälle ist *C* entweder der konsequente Lügner oder derjenige, der stets die Wahrheit sagt.

Falls *A* mit »Nein« antwortet, gibt es ebenfalls drei Möglichkeiten:

▶ Wenn *A* stets die Wahrheit sagt, ist *B* der Lügner und *C* der Wankelmütige.

▶ Wenn *A* stets lügt, sagt *B* die Wahrheit, während *C* der Wankelmütige ist.

▶ Wenn *A* der Wankelmütige ist, so lügt *B* stets oder sagt stets die Wahrheit.

Dieses Mal ist *B* in jedem Fall nicht der Wankelmütige.

Dem Hirten, den Paul sicher als nicht wankelmütig identifiziert hat, stellt er nun die zweite Frage: »Wenn ich dich fragen würde, ob der linke Weg zum Kloster führt, würdest du mit ›Ja‹ antworten?«

Ist die Antwort des Gefragten »Ja«, so nimmt Paul den linken, bei »Nein« den rechten Weg.

Warum kann er sich so sicher sein? Ganz einfach: Hat er denjenigen erwischt, der stets die Wahrheit sagt, so würde er Paul den rechten Weg weisen und ihm auch wahrheitsgemäß sagen, dass er dies tut. Der Lügner dagegen würde, direkt gefragt, ihm den falschen Weg weisen, leugnet aber, dass er das tun würde, und nennt Paul dadurch auch den richtigen Weg.

Hans Georg Römer aus Schwetzingen diskutierte noch eine Variante, bei der Paul sogar mit nur einer Frage auskommt – geeignete Seelenstruktur des Wankelmütigen vorausgesetzt:

»Wenn ich dich *jetzt* fragen würde, ob der linke Weg zum Kloster führt, würdest du mit ›Ja‹ antworten?«

Das Wort »jetzt« soll die momentane Stimmung des Wankelmütigen fixieren, sodass er bei beiden in der Frage enthaltenen Aussagen entweder lügt oder beide Male die Wahrheit sagt. Ob der sich allerdings daran hält, ist der Aufgabenstellung nicht zu entnehmen.

Die Gewinner der drei Brettspiele »Tribalance« sind Peter Schunda, Traunstein; Sebastian Christoffel, Bexbach; und Robert Pomraenke, Berlin.

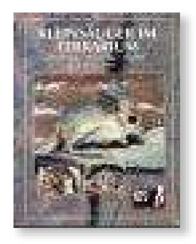
Lust auf noch mehr Rätsel? Unser Wissenschaftsportal wissenschaft-online (www.wissenschaft-online.de) bietet Ihnen unter dem Fachgebiet »Mathematik« jeden Monat eine neue mathematische Knobelei.

▷ Insgesamt zeichnet sich das schnell lesbare Buch durch seine sehr einfache Sprache aus, in der Definitionen der Fachbegriffe gut verständlich vermittelt werden. Das Buch lebt von einer Vielzahl simpler Zeichnungen, kleinen bunten Strichmännchen mit dickem Bauch, der je nach darzustellendem somatischem Marker mit Steinen, Blumen oder Schmetterlingen gefüllt ist. Da sind offensichtlich der Stift und die Zeichenlust mit der Autorin durchgegangen; für viele Szenen wäre eine einfache verbale Beschreibung absolut ausreichend gewesen.

Die Fantasie und die Fähigkeit, in einfacher Sprache zu schreiben, sind der Autorin positiv anzurechnen. Aber auf den ersten Blick wirkt das Buch auf Grund seiner Buntheit und der Strichmännchen wie ein Kinderbuch; und auf den zweiten Blick merkt man, dass es auch den entsprechenden Komplexitätsgrad nicht überschreitet. Letztlich bietet es über die mundgerecht aufbereiteten Ideen von Damasio hinaus, angereichert mit Beispielen aus der Praxis der Autorin, nichts wesentlich Neues.

Cornelia Höhle

Die Rezensentin ist Diplompsychologin und promoviert an der Universität Heidelberg über den Einfluss intuitiver und analytischer Strategien auf die Güte von Entscheidungen.



ZOOLOGIE

Christian Ehrlich

Kleinsäuger im Terrarium

Biologie – Haltung – Verhalten.

Natur und Tier, Münster 2003. 128 Seiten, € 19,80

Die Haltung so genannter exotischer Kleinsäuger in Privathand kommt immer mehr in Mode. Der Begriff Exoten umfasst dabei auch einheimische Arten wie Rötel- oder Zwergmaus – so ziemlich alles, was nicht schon als Goldhamster oder Meerschweinchen domestiziert wurde. Allerdings sind Informationen über die Haltungsansprüche der potenziellen Hausgenossen nur mühsam zu finden – meist nur auf Englisch in dicken Büchern über Säugetiere irgendeiner Region.

Christian Ehrlich, als Verhaltensbiologe und Redakteur der einschlägigen Fachzeitschrift »Rodentia« mit entsprechender Fachkompetenz ausgestattet, schließt also mit dem vorliegenden Büchlein eine Lücke. Bereits beim Durchblättern fällt die üppige Ausstattung auf – nahezu jede Seite enthält ein bis zwei Farbfotos von bester Qualität, und offenbar alle von lebenden Tieren (außer einige im Kapitel über Krankheiten vielleicht) in natürlicher Körperhaltung.

Die Artenauswahl orientiert sich an den Kleinsäugern, die derzeit in deutschen Käfigen und Terrarien zu finden sind. Ob das Kugelgürteltier dazu gehört, das Schönhörnchen aber nicht, darüber kann man geteilter Meinung sein; auch hätte bei der Diskussion von Artenschutzbestimmungen das Haltungsverbot für das Grauhörnchen erwähnt werden sollen. Einige Arten sind sicher nur für Spezialisten geeignet, aber das schreibt der Autor dazu.

Das Buch bringt zunächst auf 55 Seiten allgemeine Angaben über Verbreitung, Baupläne und Eigenschaften von Säugetieren sowie Haltung, Ernährung, Erwerb, Eingewöhnung, Arten- und Tierschutzrecht, Zucht und andere wichtige Dinge. Sehr hilfreich sind die Tabellen zu Gesundheitscheck, auffälligen Symptomen von Krankheiten und Parasitenbefall, die Hinweise auf die Notwendigkeit genetisch überlegter Zuchtprogramme und die Angaben, woran man beim Züchter eine verantwortungsvolle Haltung erkennt. Auch die Bemerkung, dass man nur wenigen niedergelassenen Tierärzten außergewöhnliche Tierarten anvertrauen kann, ist leider nur zu berechtigt.

Die Artenporträts ab Seite 56 zeigen Beutelratten, Raubbeutler, Beutelflughörnchen, Insektenfresser, Gürteltiere, je einen Flughund (Bild oben) und eine Lanzennasenfledermaus, einen Rüsselspringer und viele Nager. Die zugehörigen Texte sind fortlaufend geschrieben, mit Angaben über Verbreitung, Nahrung, Größe, Nachzucht, Sozialsystem, Artenschutzbestimmungen und Ernährung. Das liest sich zwar sehr gut, aber zum Nachschlagen wären die Größen-, Gewichts- und Altersangaben doch besser in einer Tabelle aufgehoben. Dafür ist der ständige Hinweis auf das Sozialsystem sehr löblich! Ein paar Anregungen zur Beschäftigungsfütterung wären nützlich gewesen; man kommt da nicht ohne weiteres auf die besten Ideen.



Viele Fledertiere, wie dieser Hammerkopf-Flughund *(Hypsignathus monstrosus)*, sind typische Fruchtfresser.

Einige Kleinigkeiten fallen einem im Text auf, etwa dass nicht alle Beuteltiere einen nach vorn oder hinten offenen Beutel haben: Die dann im Artenteil besprochenen Beutelratten der Gattung *Monodelphis* haben gar keinen, und viele andere Arten haben nur Hautfalten. Auch dass Säugetiere Haare haben müssen, gilt nur im Embryonalstadium.

Auffallend viele Zitate in Text und Literaturverzeichnis beziehen sich auf Ehrlichs »eigene« Zeitschrift – aber vielleicht gibt es ja oft nichts anderes, vor allem auf Deutsch.

Fazit: Durchaus hilfreich und lesenswert, auch für Leute, die nicht unbedingt selbst zur Haltung und Zucht schreiten wollen, sondern wissen möchten, was es so alles an Artenvielfalt gibt!

Udo Gansloßer

Der Rezensent ist Privatdozent am Institut für Zoologie der Universität Erlangen-Nürnberg. ◁

Nur zwölf Stufen bis zur Ewigkeit

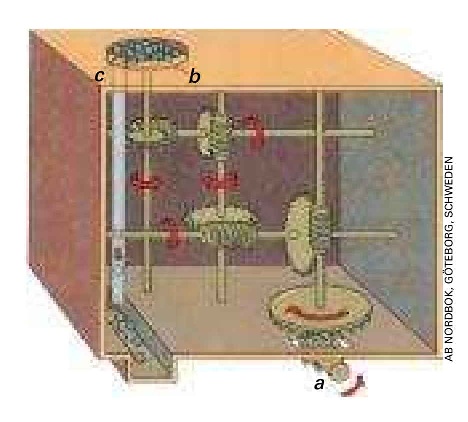
Untersetzungsgetriebe machen große Zahlen überschaubar klein – mitunter so klein, dass sie von null nicht zu unterscheiden sind.

Von Wolfgang Bürger

Zählen: Wer auf einer weiten Fahrt die Wegstrecke messen oder die Anzahl der Schritte auf einem langen Fußmarsch zählen möchte, darf keine Angst vor großen Zahlen haben. Die Räder eines 26-Zoll-Fahrrads, die mit Luftbereifung rund zwei Meter Umfang haben, drehen sich schon auf den ersten beiden Kilometern einer Radtour tausendmal um ihre Achse. Auf einem Tagesmarsch von 25 Kilometern macht der Wanderer mehr als 30 000 Schritte (von durchschnittlich achtzig Zentimeter Länge). Kinder mit ihren kurzen Beinen müssen entsprechend öfter tippeln.

Wie alle eintönigen Tätigkeiten ermüdet Zählen die Sinne. Deshalb raten wir den Kindern, die jeden Abend von neuem behaupten, noch nicht müde zu sein, die Schäfchen auf einer Wiese voll bunter Blumen zu zählen.

In vielen Generationen vor uns haben sich Ingenieure überlegt, wie sich die Mühe des Zählens vermeiden ließe, und mechanische Wegmesser erfunden, die entsprechend den Möglichkeiten der Zeit die Länge des Wegs selbsttätig registrierten, indem ein Messrad auf dem Boden abrollte. Die Nachkommen ihrer Geräte finden noch heute auf Sportplätzen Verwendung und erinnern an ihre lange Geschichte, die sich bis zu Vitruv (um 84–26 v. Chr.) und Heron von Alexandria (lebte etwa um 100 n. Chr.) zurückverfolgen lässt. Moderne Wegmesser unterscheiden sich von ihren Ahnen weniger in der Technik der Messung als durch die Art der Registrierung.



AB NORDBOK, GÖTEBORG, SCHWEDEN

▲ **Rekonstruktion von Herons Streckenmesser. Eine Achse des Wagens trieb über ein Zahnrad *(a)* vier Schneckentriebe hintereinander. Das letzte Zahnrad gab über eine Lochscheibe *(b)* den Weg für den Zählstein *(c)* frei.**

Wie genau misst ein solches Messrad? Große Unebenheiten des Untergrunds (größer als sein Durchmesser $2r$) fährt es getreulich nach und misst dabei einen längeren als den direkten Weg. Auch bei kleinen Unebenheiten überschätzt es die Weglänge, indem es den Abstand l der Unebenheiten durch einen Bogen s des Rads ersetzt. Die relative Verlängerung des Wegs $(s-l)/l$ ist aber in erster Näherung gleich $(l/r)^2/24$ und damit vernachlässigbar klein, wenn das Rad groß ist ($r \gg l$).

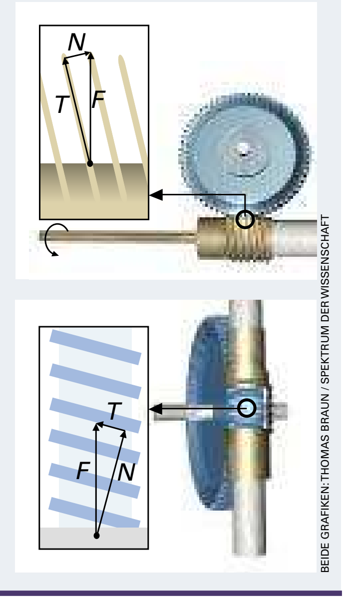
Wegmesser und Schrittzähler: Schon Vitruvs Wegmesser registrierte den Weg mit großer Untersetzung. Bei einer ganzen Umdrehung des Messrads wurde ein Zahnrad mit $N=400$ Zähnen durch einen Mitnehmer an der Radwelle um einen einzigen Zahn weiterbewegt. Erst nach vollendeter Umdrehung dieses Zahnrads fiel ein rundes Zählsteinchen aus dem Vorratsbehälter in ein bronzenes Sammelgefäß im Innern des Messwagens. Für eine Überschlagsrechnung werde die Meile zu $M=1500$ Meter angenommen. Dann muss das Messrad den Radius $r=M/2\pi N$ oder 0,60 Meter haben, wenn jedes Steinchen einer Meile des Wegs entsprechen soll. Nach der Fahrt waren allerdings die vielen Steine im Sammelbehälter zu zählen.

Von Herons Streckenmesser fehlen uns genaue Angaben. Aus der Beschreibung in Sigvard Strandhs schönem Buch »Die Maschine« lässt sich entnehmen, dass die Bewegung des Messrads vierfach durch Schneckentriebe untersetzt war. Bei einem Untersetzungsverhältnis q in jeder Stufe fuhr das Gerät daher den Weg $W=2\pi r q^{-4}$, bevor die nächste Steinkugel in den Sammelbehälter fiel. Falls Herons Messrad denselben Radius r wie das von Vitruv hatte und $q=1:20$ gesetzt wird, registrierte jede Steinkugel eine Strecke von über 600 Kilometern. Schneckentriebe erlauben erstaunlich große Untersetzungen (siehe unten).

Auf Fußwanderungen wären Wegmesser (die in historischen Berichten gelegentlich als Schubkarren abgebildet sind) sehr lästig. Bei Wanderern und Läufern haben sich deshalb Schrittzähler als »Streckenmesser in der Westentasche« durchgesetzt. In ihnen bewegt sich bei jedem Schritt ein »unterkritisch« abgestimmtes Pendel (eines, dessen Eigenfre-

Schneckentriebe

Ein Zahnrad und eine Schraube, die um zwei zueinander senkrechte Achsen drehbar sind, lassen sich nur dann bewegen, wenn sie aufeinander gleiten können. Die durch den Antrieb erzeugte Kraft F zerlegt sich in die Normalkraft N senkrecht zur Windung (die Haft- oder Reibungskräfte weckt) und die Tangentialkraft T in Richtung der Windung (die Haftungs- oder Reibungskräfte überwinden kann). Solange T kleiner bleibt als ein gewisser Teil von N ($T \leq \mu_0 N$; μ_0 Haftungs-Beiwert), blockiert das Getriebe die Bewegung durch Selbsthemmung. Die tritt bei dem kleinen Steigungswinkel der Schraubenwindungen regelmäßig ein, wenn die Schnecke durch Drehen am Zahnrad bewegt werden soll. Umgekehrt ist es bei kleinen Steigungen der Schraube stets möglich, die Haftung zu überwinden und das Zahnrad durch Drehen der Schnecke in Bewegung zu setzen.



BEIDE GRAFIKEN: THOMAS BRAUN / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



Arthur Gansons Ewigkeits-Maschine: Das letzte Zahnrad benötigt für eine Umdrehung 2,32 Billionen Jahre – theoretisch.

TECHNORAMA WINTERTHUR

quenz viel geringer als die Schrittfrequenz ist und das daher dem Schritt ohne Verzögerung folgt) infolge seiner Massenträgheit aus der Ruhelage bis zum unteren Anschlag, von wo eine Zugfeder es wieder in die Ausgangsstellung zurückzieht. Bei jedem Schritt wird ein Schaltrad um einen Schritt weiterbewegt, der sich auf die Anzeige überträgt.

Aus der Schrittzahl kann man die Weglänge durch Multiplikation mit der Schrittlänge ermitteln; eine entsprechende Skala ist in die Schrittzähler eingebaut. Das Verfahren ist nur bedingt brauchbar, weil die Schrittlänge je nach Körpergröße, Beinlänge und Müdigkeit des Wanderers und mit der Steigung des Wegs erheblich variiert.

Wasser-Wege: Wie misst man einen Weg, der auf dem Wasser zurückgelegt wird? Vitruv dachte daran, die Geschwindigkeit von Schiffen mit Schaufelrädern zu messen, die vom vorbeiströmenden Wasser gedreht werden (ähnlich wie Wasseruhren den durch eine Leitung laufenden Wasserstrom messen). Da ein Schiff aber Wasser verdrängt und daher rascher umströmt wird, als es fährt, wäre es eine bessere Idee, seine Geschwindigkeit in Bezug auf einen in weiter Entfernung in ruhendem Wasser treibenden Gegenstand zu messen. Dieser Gedanke findet sich erst im späten Mittelalter, in den Schriften des Kardinals und vielseitigen Gelehrten Nikolaus von Kues (1401–1464); so steht es in »Ruhmesblätter der Technik« von Franz Maria Feldhaus.

Verwirklicht ist er in dem jahrhundertelang in der Seefahrt verwendeten »Log« zur Messung der Schiffsgeschwindigkeit. Als dessen älteste Quelle nennt Ludwig Darmstädters »Handbuch zur Geschichte der Naturwissenschaften und der Technik« einen William Bourne und das Jahr 1577. Das mit Blei beschwerte hölzerne Logscheit, das sich bei der Umströmung durch das Wasser quer stellt, lässt man an der Logleine treiben, bis es hinter dem Schiff in ruhige Wasser kommt. Zur Messung der Geschwindigkeit des Schiffs zählt der Seemann die Knoten, während die Leine durch seine Hände gleitet. Bei der Eichung des Logs (unter Berücksichtigung der Eigengeschwindigkeit des Logscheits infolge der Zugkraft der Leine, die mit dem Strömungswiderstand des Wassers ins Gleichgewicht kommt) wird die Schnur in solchen Abständen geknotet, dass ihre Anzahl während der 14 oder 28 Sekunden, in denen eine Sanduhr abläuft, genau die Zahl der Seemeilen angibt, die das Schiff in einer Stunde zurücklegen würde. Noch heute sprechen die Seeleute von »Knoten«, wenn sie Seemeilen pro Stunde meinen.

»Ewigkeits-Maschine«: Der amerikanische Maschinenkünstler Arthur Ganson hat eine formale Vollendung von Herons Streckenmesser geschaffen – und führt ihn damit gleichzeitig ad absurdum. Statt Herons vier Stufen baute Ganson seine Maschine mit zwölf. Ihre Ausführung im Technorama in Winterthur, dem Technikmuseum der Schweiz, nennt sich »Maschine mit Granit« (Bild oben). Von einem Elektromotor angetrieben dreht sich die Antriebswelle mit $\omega = 200$ Umdrehungen pro Minute. Mit der Untersetzung im Verhältnis $q = 1:50$ bewegt sie das erste Zahnrad, das für eine Umdrehung die Zeit $1/(\omega q) = 15$ Sekunden braucht. Mit dem Zahnrad auf der gleichen Welle fest verbunden ist eine Gewindeschnecke (oder Schraube). Sie treibt mit nochmaliger Untersetzung q ein zweites Zahnrad an, das die Zeit $1/(\omega\, q^2)$ und damit schon 12,5 Minuten für eine Umdrehung braucht. Das Spiel setzt sich noch zehnmal bis zum letzten, dem zwölften, Zahnrad fort, das $T = 1/(\omega\, q^{12})$ gleich 2,32 Billionen Jahre für eine Umdrehung brauchen würde. Der Konjunktiv ist angemessen, denn T ist eine riesig große Zeit: das 169,3fache des Weltalters, das nach heutiger Schätzung 13,7 Milliarden Jahre beträgt. Die letzte Welle kann also bedenkenlos in Beton eingegossen oder (wie im Technorama) in einem Granitblock festgeschraubt werden und wird sich, solange die Welt besteht, nicht davon lösen. ◁



Wolfgang Bürger ist emeritierter Professor für Theoretische Mechanik an der Universität Karlsruhe.

Die Maschine. Von Sigvard Strandh. Herder, Freiburg 1980

Ruhmesblätter der Technik. Von Franz Maria Feldhaus. Brandstetter, Leipzig 1910

Handbuch zur Geschichte der Naturwissenschaften und der Technik. Von Ludwig Darmstädter. 2. Auflage, Julius Springer, Berlin 1908

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Eisschmelze am Nordpol

Meereis und Gletscher schwinden, Permafrostböden tauen auf, und Sträucher erobern die Tundra: Die globale Erwärmung hinterlässt unübersehbare Spuren in der Arktis.

GALEN ROWELL / CORBIS

Evolutionsgeschichte der Malaria

Erst Ackerbau in den Tropen Westafrikas schuf die Voraussetzungen für den heute gefährlichsten Malariaerreger.

VOLKER STEGER / SPL / AG. FOCUS

»Loop«-Quantengravitation

Eine neue umfassende Theorie sucht Quantenmechanik und Gravitation zu verbinden. Ihr zufolge ist der Raum körnig und sogar die Zeit macht winzige Quantensprünge.



KENN BROWN

WEITERE THEMEN IM MÄRZ

Die Mathematik der Gerechtigkeit

Wie ist ein strittiges Gut unter mehreren Anspruchsberechtigten aufzuteilen? Mit mathematischen Argumenten können althergebrachte Prinzipien konsistent weiterentwickelt werden.

UNSICHTBARES GENOM II

Die DNA ist nicht alles

Chemische Gruppen und Proteine an der Erbsubstanz können die Bedeutung der genetischen Information verändern – sichtbar bei Wachstum, Altern und Krebs.

3-D-Bildschirme

Bildschirme sind flach, die Welt ist räumlich. Neuartige Monitore sollen diesen Konflikt lösen.